



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autora :

Carola Liseth Carrión Sarmiento

C.I. 1900619956

Director :

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD

C.I. 0103907036

Co-Director :

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD

C.I. 0301496840

Cuenca - Ecuador

2018



Resumen

LoRa forma parte de las redes LPWAN, que se caracteriza por su bajo costo, sensibilidad y facilidad de implementación. Esta tecnología es adecuada para aplicaciones que requieren transmitir información sin la necesidad de grandes velocidades; un ejemplo concreto es la lectura inalámbrica de medidores de agua o energía eléctrica. Este documento propone un estudio de la tecnología LoRa y protocolo de red LoRaWAN usando el kit de evaluación LoRa 900 de Microchip; cuyo propósito es obtener un modelo empírico de pérdidas de trayectoria basado los valores de RSSI, que se obtuvieron en las campañas de medición. Las mediciones se realizaron en tres sectores representativos de la ciudad de Cuenca: Centro Histórico, Totoracocha y Oro Verde. Se demostró mediante un análisis estadístico que no es necesario variar el modelo de pérdidas de trayectoria tomando en cuenta las configuraciones de transmisión, ya que se encuentran relacionadas. Además, como trabajo previo se encontró que para valores menores a -110 dBm de RSSI, estos no son fiables. Los resultados arrojan que el sector del Centro Histórico tiene una cobertura confiable hasta los 200 metros; mientras que, en el resto de sectores se obtuvo un alcance máximo confiable de 500 metros aproximadamente. El desempeño de LoRaWAN depende de varios factores como: diferencia de elevación, tipo de obstáculos en la trayectoria de la señal y distancia entre el transmisor y receptor.

Palabras Clave: LoRa, LPWAN, LoRaWAN, RSSI, Pérdidas de trayectoria, Modelo, Transmisor, Receptor.



Abstract

LoRa is part of the LPWAN networks, which is characterized by its low cost, sensitivity and ease of implementation. This technology is suitable for applications that require transmitting information without the need for high speeds, a concrete example is the wireless reading of electricity or water meters. This document proposes a study of the LoRa technology and the LoRaWAN network protocol using the LoRa 900 evaluation kit from Microchip; whose purpose is to obtain an empirical model of path losses based on the RSSI values, which were obtained in the measurement campaigns. The measurements were made in three representative sectors of the city of Cuenca: Historic Center, Totoracocha and Oro Verde. It was demonstrated through a statistical analysis, that it is not necessary to vary the path loss model according to the transmission configurations, since they are related. In addition, as previous work it was found that for values lower than -110 dBm of RSSI, these are not reliable. The results show that the Historic Center sector has reliable coverage up to 200 meters; while in the other sectors the maximum reliable range was approximately 500 meters. The performance of LoRaWAN depends on several factors such as: elevation difference, type of obstacles in the signal path and distance between the transceiver and receiver.

Keywords: LoRa, LPWAN, LoRaWAN, RSSI, Path loss, Model, Transceiver, Receiver.



Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Dedicatoria	XVII
Agradecimientos	XIX
Abreviaciones y acrónimos	XXI
1. Introducción	1
1.1. Identificación del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Internet de las Cosas	5
2.2. Medidores inteligentes	6
2.3. Tecnología LoRa	7
2.3.1. Espectro Ensanchado LoRa	7
2.3.2. Parámetros de Transmisión	7
2.4. LoRaWAN	8
2.4.1. Clases:LoRaWAN	8



2.4.2.	Formatos de Mensajes Físicos	10
2.4.3.	Factor de dispersión y sensibilidad	10
2.4.4.	Tasa de datos y potencia de transmisión	11
2.4.5.	Seguridad: Activación de un Dispositivo Final	11
2.5.	Modelo de Pérdidas de Trayectoria	13
2.6.	Conclusiones	14
3.	Estado del Arte	15
3.1.	Trabajos relacionados con LoRa: capa red LoRaWAN	15
3.2.	Conclusiones	17
4.	Metodología	19
4.1.	Equipos	19
4.1.1.	Kit de Evaluación de LoRa - 900	19
4.1.2.	Raspberry Pi 3 modelo B	21
4.1.3.	Ubicación de Equipos	22
4.1.4.	Configuración de Equipos	22
4.2.	Ambientes seleccionados para las pruebas de campo	23
4.2.1.	Sector Totoracocha	23
4.2.2.	Sector Centro Histórico	25
4.2.3.	Sector Hotel Oro Verde	26
4.3.	Procedimiento de Medición	30
4.4.	Análisis Estadístico	31
4.4.1.	Medidas numéricas	31
4.4.2.	Intervalos de Confianza	32
4.4.3.	Comparación de los datos obtenidos en las campañas de medición.	33
4.5.	Conclusiones	33
5.	Resultados	35
5.1.	Comparación estadística	35
5.1.1.	Sector Centro Histórico	36
5.1.2.	Sector Totoracocha	38
5.1.3.	Sector Oro Verde	40
5.2.	Ajuste Logarítmico de los valores RSSI	42
5.2.1.	Sector Centro Histórico	42
5.2.2.	Sector Totoracocha	44
5.2.3.	Sector Oro Verde	45
5.3.	Ajuste Logarítmico General de los valores RSSI	47
5.3.1.	Sector Centro Histórico	47
5.3.2.	Sector Totoracocha	47



5.3.3. Sector Oro Verde	48
5.4. Modelo de pérdidas de trayectoria	49
5.4.1. Sector Centro Histórico	49
5.4.2. Sector Totoracocha	50
5.4.3. Sector Oro Verde	52
5.5. Modelo de pérdida de trayectoria general	53
5.5.1. Sector Centro Histórico	54
5.5.2. Sector Totoracocha	54
5.5.3. Sector Oro Verde	54
5.5.4. Comparación de los modelos propuestos.	55
5.5.5. Comparación de los modelos propuestos con LoRaSim	56
5.6. Conclusiones	58
6. Conclusiones y Recomendaciones	59
6.1. Conclusiones	59
6.2. Recomendaciones	60
6.3. Trabajos Futuros	60
A. Reporte Técnico	65
Bibliografía	99



Índice de figuras

2.1. Arquitectura en estrella de LoRaWAN	9
2.2. Clases de LoRaWAN [1]	9
2.3. Estructura física de mensajes de uplink [1]	10
2.4. Estructura física de mensajes de downlink [1]	10
4.1. Kit de Evaluación de LoRa - 900 [2]	20
4.2. Gateway LoRa [3]	21
4.3. LoRa Motes [4]	21
4.4. Raspberry Pi 3 modelo B [5]	22
4.5. Diagrama de bloques de los equipos.	22
4.6. Circuito de control.	23
4.7. Sector Totoracocha.	24
4.8. Perfil de elevación sector Totoracocha.	25
4.9. Sector Centro Histórico.	26
4.10. Perfil de elevación sector Centro Histórico.	27
4.11. Sector Oro Verde.	28
4.12. Perfil de elevación sector Oro Verde.	29
4.13. Ubicación de los equipos.	30
5.1. Modelo de RSSI entre zona 2 y zona 3 con $P = 0,3702$	38
5.2. Modelo de RSSI entre zona 2 y zona 8 con $P = 0$	39
5.3. Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 2 con $P=0.3280$	40
5.4. Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 4 con $P=0.0116$	41
5.5. Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 2 con $P=0.0013$	42
5.6. Valores de RSSI en el Centro Histórico	43
5.7. Rango útil de valores de RSSI en el Centro Histórico	44
5.8. Valores de RSSI en el sector de Totoracocha	45
5.9. Rango útil de valores de RSSI en Totoracocha	45
5.10. Valores de RSSI en el sector del hotel Oro Verde	46
5.11. Rango útil de valores de RSSI en el sector Oro Verde	46



5.12. Valores de RSSI general en el Centro Histórico	47
5.13. Valores de RSSI general en el sector Totoracocha	48
5.14. Valores de RSSI general en el sector Oro Verde	49
5.15. Modelo de Pérdidas de trayectoria en el Centro Histórico	50
5.16. Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en el Centro Histórico	51
5.17. Modelo de Pérdidas de trayectoria en Totoracocha	51
5.18. Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en Totoracocha	52
5.19. Modelo de Pérdidas de trayectoria en el sector Oro Verde	53
5.20. Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en el sector Oro Verde	53
5.21. Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el Centro Histórico	54
5.22. Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el sector del Totoracocha	55
5.23. Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el sector del Oro Verde	56
5.24. Modelo de Pérdidas de trayectoria de los tres sectores.	56
5.25. Modelos de Pérdidas de trayectoria del sector Oro Verde y LoRaSim	57



Índice de tablas

2.1. Tecnologías de Internet de las Cosas	6
2.2. Tipos de mensajes MAC [1]	11
2.3. Relación entre SF y la Sensibilidad	11
2.4. Tasa de datos de transmisión [6]	12
2.5. Potencia de Transmisión	12
4.1. Valores de z comunes. [7]	32
5.1. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 1	36
5.2. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 2	36
5.3. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 3	36
5.4. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 4	36
5.5. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 5	37
5.6. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 6	37
5.7. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 7	37
5.8. Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 8	37
5.9. Valores P del Test de Dunn entre diferentes zonas en el Centro Histórico	38
5.10. Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 1	39
5.11. Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 2	39
5.12. Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 3	39
5.13. Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 4	40
5.14. Valores P del Test de Dunn entre diferentes zonas en Totoracocha	40
5.15. Valores P del Test de Dunn Sector Oro Verde Zona 1	41
5.16. Valores P del Test de Dunn Sector Oro Verde Zona 2	41
5.17. Coeficientes del modelo de RSSI en el Centro Histórico	43
5.18. Coeficientes del modelo de RSSI en Totoracocha	44
5.19. Coeficientes del modelo de RSSI en el sector Oro Verde	46
5.20. Coeficientes del modelo de RSSI general en el Centro Histórico	47
5.21. Coeficientes del modelo de RSSI general en Totoracocha	48
5.22. Coeficientes del modelo de RSSI general en el sector Oro Verde	48



5.23. Parámetros fijos para el modelo de pérdidas de trayectoria.	49
5.24. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en el Centro Histórico	50
5.25. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en Totoracocha	51
5.26. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en el sector Oro Verde	52
5.27. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en el Centro Histórico.	54
5.28. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en Totoracocha.	55
5.29. Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en el sector Oro Verde.	55
5.30. Modelo de Pérdidas de Trayectoria	58



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Carola Liseth Carrión Sarmiento, autor del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 de octubre de 2018

Carola Liseth Carrión Sarmiento

C.I: 1900619956



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Carola Liseth Carrión Sarmiento, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de octubre de 2018

Carola Liseth Carrión Sarmiento

C.I: 1900619956



Dedicatoria

A Dios por su infinita bondad, por permitirme tener a mi familia y amigos, a mis padres y hermanas por el apoyo y motivación constante hasta llegar a esta etapa. Finalmente a mi novio e hijo, que son el motor para seguir luchando por mis metas.

Carola Liseth Carrión Sarmiento



Agradecimientos

Mi gratitud a cada uno de mis maestros que formaron parte de mi proceso de formación, de manera especial a los Ingenieros Fabián Astudillo, Andrés Vázquez y Alcides Araujo; quienes con su sabiduría supieron guiarme en la elaboración de este proyecto de investigación.

Carola Liseth Carrión Sarmiento



Abreviaciones y Acrónimos

PHDR_CRC Header CRC. [11](#)

ABP Activation By Personalization. [13](#)

ADR Adaptive Data Rate. [9](#)

AMI Advanced Metering Infrastructure. [2](#)

AppEUI Application identifier. [13](#)

AppKey AES-128 key. [13](#)

AppSKey Application session key. [13](#)

BS Base Station. [7](#)

BW Bandwidth. [3](#), [8](#), [9](#)

CF Carrier Frequency. [8](#)

CR Coding Rate. [8](#), [9](#)

CRC Cyclic redundancy check. [11](#)

CSS Chirp Spread Spectrum Modulation. [7](#), [17](#)

DevAddr End-device address. [13](#)

DevEUI Globally Unique End-device Identifier. [13](#)

DevNonce Nonce of 2 octets. [13](#)

DR Data Rate. [12](#), [21](#)

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum. [7](#), [8](#)

IoT Internet of Things. [2](#), [6](#), [7](#), [18](#), [64](#)

ISM Industrial, Scientific and Medical. [2](#)

LoRa Long Range. [2](#), [4–7](#), [9](#), [11](#), [13](#), [15–18](#), [20–22](#), [39](#), [40](#), [61](#), [63](#), [64](#)

LoRaSim LorRa Simulator. [4](#)

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. [2–6](#), [9–13](#), [15–18](#), [24](#), [25](#), [39](#), [63](#), [64](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [2](#), [5–7](#), [17](#), [18](#)

MAC Media Access Control. [11](#), [13](#), [17](#), [23](#), [24](#), [39](#)

MIC Message Integrity Code. [11](#)



NwkSKey Network session key. [13](#)

OTAA Over The Air Activation. [13](#)

PER Packet Error Rate. [3](#), [4](#), [18](#), [19](#), [37](#)

PHDR Physical Header. [11](#)

PHYPayload PHY payload. [11](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [3](#), [4](#), [14](#), [15](#), [18](#), [19](#), [37](#), [41](#), [48–56](#), [63](#), [67](#)

SF Spreading Factor. [3](#), [8](#), [11](#), [15](#), [17](#), [19](#), [36](#), [39](#), [41](#), [43](#), [45](#), [48](#), [61](#), [63](#)

SNR Signal to Noise Ratio. [3](#), [4](#), [8](#), [19](#), [63](#)

SPI Serial Peripheral Interface. [22](#)

TP Transmission Power. [8](#)



Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se expone el problema y justificación del proyecto de investigación, así como el alcance y los objetivos generales y específicos a cumplir durante su desarrollo.

1.1. Identificación del Problema

Con el desarrollo del [Internet of Things \(IoT\)](#), han surgido varias aplicaciones que se enmarcan en el contexto de ciudades inteligentes, un ejemplo concreto es la lectura de medidores inteligentes de forma inalámbrica [8]. Las soluciones de infraestructura de medición avanzada ([Advanced Metering Infrastructure \(AMI\)](#)) permite el intercambio de información; entre los consumidores del suministro eléctrico o de agua y las empresas de distribución. Esto con el fin de lograr la recopilación y distribución de información, usando tecnologías de comunicación inalámbrica como GSM, GPRS, WIFI y ZigBee [9].

En la actualidad, diversas tecnologías de [IoT](#) de largo alcance y bajo consumo ([Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#)) están disponibles en el mercado. Entre estas opciones, la más interesante por su sensibilidad y facilidad de implementación es la tecnología [Long Range Wide Area Network \(LoRaWAN\)](#) [10].

Por otro lado, para el diseño de una red inalámbrica uno de los principales objetivos es la estimación de la distancia máxima de cobertura en función de diferentes parámetros que incluyen: topografía del terreno, tolerancia a fallas, escalabilidad, topología de red de sensores, restricciones de hardware, medios de transmisión, consumo de energía, pero también depende del entorno operativo para tener una conexión confiable.

Existen varios estudios que se enfocan en el comportamiento de [LoRaWAN](#) en diferentes entornos [11],[12]. La contribución de este trabajo es el ajuste de un modelo de propagación que facilite el desarrollo de redes de sensores con tecnología [LoRaWAN](#) en un ambiente urbano, con el fin de facilitar la transmisión de los datos de lectura de los medidores de forma inalámbrica.

1.2. Justificación

Long Range (LoRa) es una plataforma inalámbrica que se caracteriza por su bajo consumo energético, largo alcance y transmisión segura de datos. Además, este tipo de tecnología proporciona una cobertura de mayor alcance en comparación con las redes celulares existentes, llegando a más de 10 km con línea de vista [13]. Utiliza el espectro radioeléctrico sin licencia en las bandas Industrial, Científica y Médica (**Industrial, Scientific and Medical (ISM)**) [14].

Por su parte, **LoRaWAN** es la red en la que opera **LoRa**. Aunque existen otros enfoques que operan sobre la misma capa física como: LoRaBlink y LoRa FABIAN, este trabajo se centra en **LoRaWAN** debido a que se pretende usar **LoRa** para dispositivos **IoT** que desean transmitir poca información sin necesidad de grandes velocidades [15].

La arquitectura de red **LoRaWAN** usa una topología en estrella, en la que la red de dispositivos conectados denominados nodos establecerán un enlace inalámbrico con el *gateway* mediante un único salto. A su vez, el *gateway* es capaz de transmitir toda la información de estos dispositivos a servidores web para que la misma sea procesada en diversos tipos de aplicaciones [16]. Los datos en redes **LoRaWAN** están encriptados con AES128 con mitigación anti-repetición, siendo una tecnología adecuada para redes seguras de recopilación de datos como medidores inteligentes en ciudades inteligentes [17, 18].

1.3. Alcance

El proyecto se enfoca en el ajuste de un modelo de propagación que facilite el desarrollo de redes de sensores con tecnología **LoRaWAN** en un ambiente urbano. Esto con el fin de que se use en implementaciones futuras de sistemas de medición inalámbrica del consumo de agua y energía eléctrica de las viviendas de una ciudad. Cabe recalcar que, aunque este trabajo se centra en esta aplicación específica, los resultados pueden ser de utilidad para cualquier tipo de aplicación en un ambiente urbano.

Se pretende entonces, realizar mediciones del **Received Signal Strength Indicator (RSSI)**, utilizando el kit de evaluación LoRa 900 de Microchip, el cual trabaja en la frecuencia de 915MHz, para evaluar el rango de transmisión. El kit permite la modificación de parámetros como el **Spreading Factor (SF)**, **Bandwith (BW)** y potencia de transmisión.

Se realizarán pruebas iniciales en un entorno controlado de laboratorio para garantizar la fiabilidad de las mediciones basadas en **RSSI**. Los conjuntos de mediciones para este proyecto se tomarán en sectores representativos de la ciudad de Cuenca, dichos sectores serán escogidos conjuntamente con el análisis de la metodología de medición, en las que un nodo **LoRa** actuará como transmisor, y el *gateway* del kit como receptor. El **Packet Error Rate (PER)**, actuará como parámetro de calidad general de la red. Las transmisiones serán receptadas por el *gateway*, que a su vez las transmitirá al servidor; el mismo que, irá guardando un registro de los **RSSI**, **Signal to Noise Ratio (SNR)** y **PER** de las transmisiones. Las transmisiones serán evaluadas con antenas tipo omnidireccionales y direccionales.



Con los datos obtenidos en un entorno urbano, se procederá a ajustar una curva de pérdidas de trayectoria basada en [RSSI](#) y [PER](#) para obtener un modelo empírico de pérdidas para el área requerida y posteriormente implementar en LoRaSim [19].

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Ajustar un modelo de propagación basado en [RSSI](#), [PER](#) y [SNR](#) que permita realizar modelos analíticos y simulaciones para facilitar la implementación de redes de sensores con tecnología [LoRaWAN](#) en entornos urbanos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte y metodología de medición del rango de propagación en zonas urbanas.
- Configurar el kit de desarrollo de [LoRa](#) con [LoRaWAN](#), para el envío y captura de datos.
- Hacer una campaña de mediciones en las que se tomarán muestras de [RSSI](#), [SNR](#) y [PER](#) a diferentes distancias con diferentes tamaños de carga útil y potencia de transmisión.
- Ajustar un modelo de propagación adecuado para la tecnología LoRa en ambientes urbanos.
- Comparar el modelo por defecto de [LorRa Simulator \(LoRaSim\)](#) con el modelo de propagación propuesto.
- Comparar con los modelos obtenidos en distintos escenarios y entornos de operación.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Capítulo 2

Marco Teórico

Con el rápido desarrollo del **IoT**, han aparecido varias tecnologías de cobertura amplia y baja potencia (**LPWAN**), un ejemplo concreto es la tecnología **LoRa**. Esta tecnología se caracteriza por tener amplio rango de transmisión, bajo consumo de energía y transmisión segura de datos, siendo así una tecnología adecuada para la implementación de medidores inteligentes en el contexto de ciudades inteligentes.

LoRaWAN es un protocolo de red construido sobre **LoRa**, que optimiza los parámetros técnicos como el consumo energético en dispositivos finales. En el presente capítulo, se presenta detalladamente la tecnología **LoRa** y **LoRaWAN**. Además, se muestra un modelo de pérdidas de trayectoria basado en las campañas de medición realizadas durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

2.1. Internet de las Cosas

IoT se refiere a la interconexión de dispositivos a internet, es decir dispositivos tales como: sensores o actuadores que están equipados con una interfaz de telecomunicaciones y unidades de procesamiento y almacenamiento, permitiendo así nuevas formas de interacción entre seres humanos y dispositivos, o directamente entre dispositivos [20].

Todo el sistema de **IoT** se basa en las tecnologías inalámbricas que se utilizan para proporcionar acceso a datos a los dispositivos finales. Las principales tecnologías de **IoT** se describen en la Tabla 2.1 [17].

Recientemente, diversas tecnologías de **IoT** de largo alcance y bajo consumo (**LPWAN**) están disponibles en el mercado. Estas tecnologías ofrecen gran alcance, escalabilidad y bajo consumo energético a cambio de una baja velocidad de datos y una mayor latencia. Entre estas opciones, la más interesante por su sensibilidad y facilidad de implementación es la tecnología **LoRa** [21].

Existen varias aplicaciones de **IoT**, los requisitos y especificaciones de diseño de **LPWAN** para estas aplicaciones son [22]:

Tecnología	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	6LowPAN	Z-Wave
Frecuencia	2.5,5GHz	2.4 GHz	2.4 GHz,868 MHz	2.4 GHz	900 MHz
Alcance	~ 100m	~ 50m	~ 500m	~ 200m	~ 100m
Velocidad	600 Mbps	~ 1 Mbps	256 Kbps	200 Kbps	40 Kbps
Topología	Estrella	Estrella/Malla	Malla	Malla	Malla
Interoperabilidad	Alta	Media	Alta	Baja	Alta
Estándar	802.11	802.15.4	802.15.4	802.15.4	ITU-T G.9959

Tabla 2.1: Tecnologías de Internet de las Cosas

- Autonomía energética, es decir que los dispositivos conectados no requieran remplazo de la batería durante un largo periodo de tiempo.
- Bajo costo. Especialmente cuando se requiere montar una infraestructura completa para un caso comercial, hay que tomar en cuenta los costos de despliegue, por lo que se requiere un mínimo costo del dispositivo.
- Cobertura extendida. Este requisito es esencial para aplicaciones que están en interiores o detrás de muros de concreto como los medidores inteligentes.
- Escalabilidad. Debido al gran crecimiento de los dispositivos [IoT](#), cada estación base ([Base Station \(BS\)](#)), [LPWAN](#) debe admitir una gran cantidad de dispositivos [IoT](#).

2.2. Medidores inteligentes

En varios países se ha implementado el intercambio de información; entre los consumidores de energía eléctrica o agua y las empresas de distribución (medidores inteligentes). Reemplazando así a los medidores electromecánicos, con múltiples ventajas siendo la principal; la capacidad de recibir información precisa acerca del consumo de dichos servicios.

La medición inteligente ofrece beneficios como la retroalimentación en tiempo real sobre el uso de agua o energía eléctrica, esto lleva a concientizar a los clientes acerca del consumo y posteriormente a un ahorro de estos servicios.

La automatización de la lectura de agua y energía eléctrica libera a las empresas del lento proceso de lectura manual, reduciendo de esta manera los costos de personal y precisión de los datos para facturación. Además, permite a las empresas una vista en tiempo real de la cuadrícula de distribución para una rápida identificación y resolución de problemas.

Los medidores inteligentes requieren una comunicación confiable y escalable con un mínimo costo sin altas velocidades de transmisión. Las redes [LPWAN](#) son óptimas para este tipo de aplicaciones ya que ofrece una comunicación confiable de largo alcance a bajo costo a expensas del rendimiento de datos [23].

2.3. Tecnología LoRa

LoRa es una tecnología de propiedad de Semtech que brinda una comunicación de largo alcance, bajo consumo energético y transmisión segura de datos. Esta tecnología es un esquema de modulación de espectro ensanchado con chirps ([Chirp Spread Spectrum Modulation \(CSS\)](#)) [13], además es una implementación de capa física e independiente de las capas superiores lo que permite interoperar con las redes existentes [1].

2.3.1. Espectro Ensanchado LoRa

En el [Direct Sequence Spread Spectrum \(DSSS\)](#), la fase de portadora del transmisor se puede cambiar al multiplicar la señal por un código o secuencia de *chips*. La secuencia de *chips* se encuentra a una tasa mayor que la secuencia de datos, por lo tanto la multiplicación de estas dos señales da como resultado una señal con mayor ancho de banda que la señal original. DSSS presenta limitaciones para redes de bajo costo o restricciones de energía.

La modulación LoRa se presenta como una técnica más robusta de bajo costo y baja potencia. Dentro de esta modulación, la dispersión del espectro se logra generando una señal *chirp* que varía continuamente en frecuencia. Los tiempos y desplazamientos en frecuencia son equivalentes entre el transmisor y el receptor, de esta manera se reduce la complejidad del diseño del receptor. Finalmente la señal es ensanchada y modulada en un *chirp*.

La velocidad de bits de modulación R_b esta definida por la Ecuación 2.1:

$$R_b = SF * \frac{\frac{4}{4+CR} \frac{bits}{sec}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (2.1)$$

Donde:

SF Factor de ensanchamiento. (7-12)

CR Tasa de codificación. (1-4)

BW Ancho de banda(Hz)

Se define el código de tasa como:

$$Codigotasa = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

2.3.2. Parámetros de Transmisión

Un equipo de transmisión LoRa típico, proporciona cinco parámetros de configuración: [Transmission Power \(TP\)](#), [Carrier Frequency \(CF\)](#), **SF**, **BW** y [Coding Rate \(CR\)](#). La combinación de todos estos parámetros determinan cuanto es el rango de transmisión, el consumo de energía y la resistencia al ruido. A continuación se describe cada uno de estos parámetros [15]:

- **Potencia de transmisión (TP):** Se puede ajustar de -4dBm a 20dBm en pasos de 1 dB, aunque por limitaciones de implementación el rango se ajusta de 2dBm a 20dBm. En niveles de potencia superiores a 17dBm se puede utilizar un ciclo de trabajo del 1 %.
- **Frecuencia de portadora (CF):** Varía entre 137MHz y 1020MHz en pasos de 61Hz. El rango se puede limitar de 860MHz a 1020MHz dependiendo del *chip LoRa*.
- **Factor de ensanchamiento (SF):** Se conoce como SF a la relación entre la tasa de símbolos y la velocidad de *chips*. Mientras más alto el SF el SNR aumenta junto con el alcance, sensibilidad y tiempo de uso del paquete. Un aumento de SF reduce la velocidad de transmisión por lo que la duración de la transmisión crece al igual que el consumo energético. El SF varía de 6 a 12.
- **Ancho de Banda (BW):** Un mayor BW proporciona una mayor tasa de datos con una sensibilidad menor. Hay que tomar en cuenta que los datos se envían a una velocidad de *chip* igual al ancho de banda. Una red LoRa típica opera a 500 kHz, 250 kHz o 125 kHz.
- **Tasa de codificación (CR):** Es la tasa de error hacia delante que protege contra ráfagas de interferencia, mientras más alto sea el CR, existe mayor protección a costa del tiempo en el aire. Se puede configurar en 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8. Los dispositivos configurados con diferentes CR se pueden comunicar utilizando un encabezado explícito.

2.4. LoRaWAN

LoRaWAN es una especificación de protocolo desarrollada por LoRa Alliance que utiliza el esquema de modulación LoRa [13]. Las redes LoRaWAN típicamente tienen una topología en estrella como se observa en la Figura 2.1, en las que el *gateway* retransmiten mensajes entre los dispositivos finales y un servidor central.

Entonces, los dispositivos finales establecerán una red con comunicación inalámbrica LoRa con el *gateway*. A su vez, este *gateway* transmitirá toda la información de los dispositivos finales a todos los elementos que lo soliciten a través de conexiones IP [1].

Los dispositivos finales cambian de canal de forma pseudoaleatoria usando cualquier velocidad de datos disponible, estas velocidades son una compensación entre el rango de comunicación y duración del mensaje, están en el rango de 0.3 kbps a 50 kbps. LoRa tiene la capacidad de administrar la velocidad de datos en cada uno de los dispositivos finales a través de un esquema de Adaptive Data Rate (ADR).

2.4.1. Clases:LoRaWAN

Los dispositivos LoRaWAN implementan varias funcionalidades para diferentes aplicaciones. De acuerdo a la Figura 2.2 esta tecnología presenta tres clases que se explican a continuación.

- Dispositivos finales de Clase A: estos dispositivos establecen comunicaciones bidireccionales, cada transmisión de enlace ascendente del dispositivo final esta seguida por dos

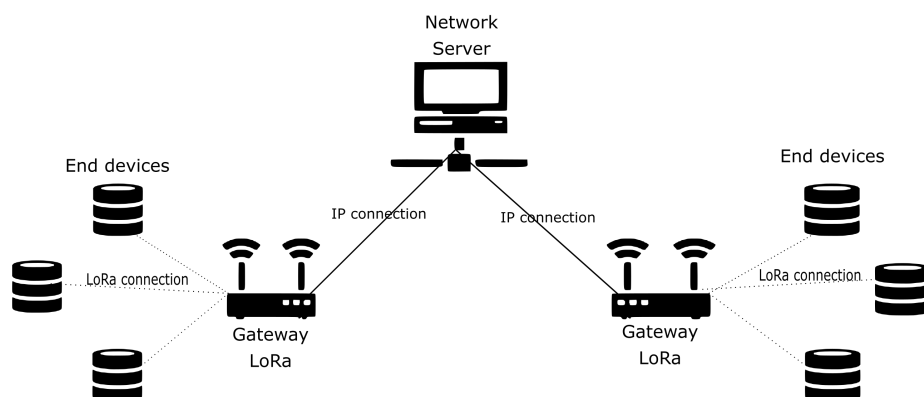


Figura 2.1: Arquitectura en estrella de LoRaWAN

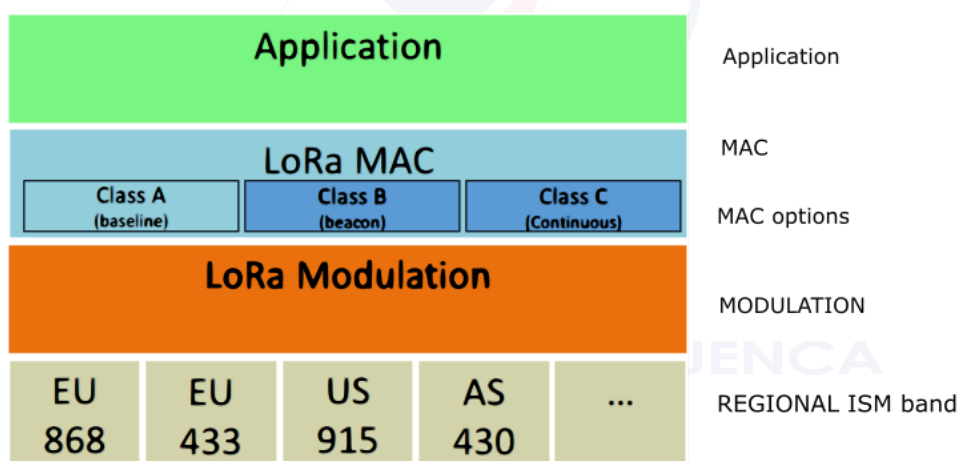


Figura 2.2: Clases de LoRaWAN [1]

ventanas cortas de recepción de enlace descendente, por lo que es idóneo para aplicaciones donde se necesita enviar información desde el dispositivo final con el menor uso energético.

- Dispositivos finales de Clase B: permiten la comunicación de enlace descendente del dispositivo final añadiendo ventanas de recepción. Las ventanas adicionales a las de clase A en el dispositivo final se consigue mediante el envío de balizas sincronizado en el tiempo por parte del *gateway*. La recepción continua de balizas hace que su consumo energético sea mayor con respecto a los dispositivos de Clase A.

- Dispositivos finales de Clase C: los dispositivos finales escuchan de manera continua siempre y cuando no estén transmitiendo. Ofrecen menor latencia en la comunicación entre el *gateway* y el dispositivo final a costa de mayor uso de energía.

2.4.2. Formatos de Mensajes Físicos

En LoRaWAN existen dos tipos de mensaje: *uplink* y *downlink*.

Los mensajes de *uplink* son enviados por dispositivos finales al servidor de red a través de uno o mas *gateway*, la estructura de estos mensajes se observa en la Figura 2.3 que incluyen el encabezado físico LoRa (Physical Header (PHDR)), un *Cyclic redundancy check* (CRC) de encabezado (Header CRC (PHDR_CRC)). La integridad de carga útil esta protegido por un CRC.

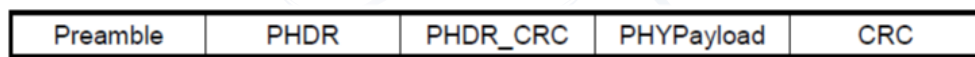


Figura 2.3: Estructura física de mensajes de uplink [1]

Cada mensaje de *downlink* es enviado por el servidor a un solo dispositivo final a través de un solo *gateway*, estos mensajes usan el modo explícito de paquete de radio, en el que incluyen el encabezado físico LoRa (PHDR) y un CRC de encabezado (PHDR_CRC).

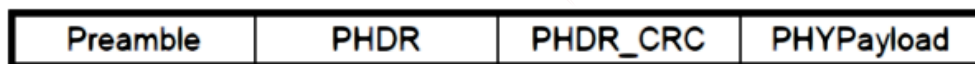


Figura 2.4: Estructura física de mensajes de downlink [1]

En los mensajes de *uplink* y *downlink* de LoRa el *payload* de capa física (PHY payload (PHYPayload)) esta integrado por: un encabezado Media Access Control (MAC), el MAC del *payload* y un código de integridad de mensaje (Message Integrity Code (MIC)). El encabezado MAC especifica el tipo de mensaje y la versión del formato de la trama de la especificación de la capa de LoRaWAN con la que ha sido codificada.

LoRaWAN distingue seis tipos de mensajes MAC diferentes como se observa en la Tabla 2.4.2:

2.4.3. Factor de dispersión y sensibilidad

La red LoRaWAN es la encargada de administrar el factor de ensanchamiento utilizado y la potencia de señal de transmisión para optimizar el rendimiento y la escalabilidad [24]. Es importante considerar que a mayor distancia entre el nodo y el *gateway*, el SF y sensibilidad será mayor, disminuyendo de esta manera la velocidad de transmisión. Tabla 2.3.

MType	Descripción
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

Tabla 2.2: Tipos de mensajes MAC [1]

SF	Tasa de bits equivalente (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134.5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Tabla 2.3: Relación entre SF y la Sensibilidad

2.4.4. Tasa de datos y potencia de transmisión

Para la transmisión **LoRaWAN** cuenta con 16 canales en las bandas de 433 Mhz y 868 Mhz en Europa, y de 72 canales en la banda de 900 Mhz en US. Los dispositivos finales pueden transmitir por cualquier canal disponible utilizando cualquier tasa de datos sin sobrepasar el ciclo máximo de trabajo ni el tiempo máximo de duración en la transmisión. En Ecuador, según el plan nacional de frecuencias [25] rige la normativa estadounidense, la cual es una banda de uso libre.

La FCC impone un tiempo máximo de transmisión de 400 ms en *uplink* para la banda US 902-928 MHz. **LoRaWAN** cumple con las regulaciones, en la Tabla 2.4 se expone los diferentes **Data Rate (DR)** y configuraciones. Las potencias de transmisión se presentan en la Tabla 2.5.

2.4.5. Seguridad: Activación de un Dispositivo Final

LoRaWAN incluye dos niveles de seguridad uno para la red y otro para la aplicación [24]. En la capa de seguridad de la aplicación se garantiza que el operador no tenga acceso a los datos de la aplicación del usuario final. Entonces, después de la activación del dispositivo final se almacena la siguiente información:

- Dirección del dispositivo final (**End-device address (DevAddr)**): consta de 32 bits que identifica el dispositivo final dentro de la red actual.

DR	Configuración	Tasa de Bits	Capa física(bit/seg)
0	LoRa:SF10/125kHz		980
1	LoRa:SF9/125kHz		1760
2	LoRa:SF8/125kHz		3125
3	LoRa:SF7/125kHz		5470
4	LoRa:SF8/500kHz		12500
5:7	RFU		
8	LoRa:SF12/500kHz		980
9	LoRa:SF11/500kHz		1760
10	LoRa:SF10/500kHz		3900
11	LoRa:SF9/500kHz		7000
12	LoRa:SF8/500kHz		12500
13	LoRa:SF7/500kHz		21900
14	RFU		

Tabla 2.4: Tasa de datos de transmisión [6]

Potencia Tx	Configuración
0	$30dBm - 2 * Potencia$
1	28 dBm
2	26 dBm
3:9	...
10	10 dBm
11:15	RFU

Tabla 2.5: Potencia de Transmisión

- Identificador de Aplicación (**Application identifier (AppEUI)**): es un ID de aplicación global que identifica de forma única al proveedor de la aplicación.
- Clave de sesión de red (**Network session key (NwkSKey)**): es usado por el *gateway* y el dispositivo final para cifrar y descifrar el campo de carga útil de mensajes de datos solo para **MAC**, además se usa para garantizar la integridad de los datos.
- Clave de sesión de aplicación (**Application session key (AppSKey)**): es usado para cifrar y descifrar el campo de carga útil de los mensajes de datos específicos de la aplicación.

Para conectarse en una red **LoRaWAN** existen dos métodos para configurar y activar los dispositivos finales, ya sea por medio de la activación por aire (**Over The Air Activation (OTAA)**) o mediante activación por personalización (**Activation By Personalization (ABP)**).

- Activación en el aire (**OTAA**): para poder conectarse a una red, el dispositivo final debe seguir un procedimiento de conexión. Entonces, se debe configurar varios parámetros necesarios: un identificador de dispositivo final único en el mundo (**Globally Unique End-device Identifier (DevEUI)**), el identificador de aplicación (**AppEUI**) y una llave criptográfica (**AES-128 key (AppKey)**) específica para el dispositivo de la que se derivará la llave de sesión y la llave de sesión de aplicación. El procedimiento de activación empieza cuando el

dispositivo final envía un mensaje **MAC** de solicitud de unión a la red *join-request*, entonces el servidor de red responde con un mensaje **MAC** de aceptación de unión denominado *join-accept*.

- El mensaje de solicitud de unión está compuesto por: **AppEUI** y **DevEUI** seguidas de una frecuencia de dos octetos (**Nonce of 2 octets (DevNonce)**).
- El mensaje de aceptación se envía como un enlace descendente normal, pero usa los retrasos *join_accept_delay1* o *join_accept_delay2*. No se da respuesta al dispositivo final si la solicitud de unión no es aceptada.
- Activación por personalización (**ABP**): se configura el dispositivo final mediante personalización. La activación por personalización significa que **DevAddr** y las dos claves de sesión **NwkSKey** y **AppSKey** se almacenan directamente en el dispositivo final, entonces este se encuentra listo con la información necesaria para formar parte de una red **LoRa** específica.

2.5. Modelo de Pérdidas de Trayectoria

En el diseño de sistemas de comunicación, modelar las pérdidas de potencia de la señal en función de la distancia de propagación, en diferentes ambientes es útil para determinar la posición de antenas y repetidores, la ubicación de nodos, etc. Los modelos de propagación pueden ser teóricos y empíricos, los primeros son modelos determinísticos que se basan en la teoría electromagnética, mientras que los segundos se basan en campañas de medición realizadas sobre un entorno. Los modelos semi-determinísticos toman en cuenta las medidas realizadas sobre algún entorno y luego se ajusta a algún modelo teórico.

Para el modelado matemático se aplicó una ecuación logarítmica, como los trabajos [26], [14], el cual se basa en el indicador **RSSI** que mide la intensidad de la señal en el receptor cuando se propaga a través del espacio. Ver Ecuación 2.3.

$$P_L = P_0 + 20\log(d/d_0) + X_\theta \quad (2.3)$$

Donde d y d_0 es la distancia de transmisión y la distancia de referencia respectivamente, mientras que P_0 es la potencia a la distancia de referencia d_0 . X_θ es una variable aleatoria con distribución gaussiana y media cero con desviación estándar θ . Otra manera común de expresar el modelo de propagación es una ecuación exponencial en función de la frecuencia f y distancia d . Ver Ecuación 2.4.

$$L(dB) = A * f^B d^C \quad (2.4)$$

Donde A , B y C son parámetros ajustados a partir de los datos de medición. En [26] simplifica el modelo de pérdida a la Ecuación 2.5:

$$P_L(dB) = a + b \log(d) + X_\theta \quad (2.5)$$

Los coeficientes a y b se ajustan a partir de los datos de medición, X_θ es la característica aleatoria estocástica de la intensidad de la señal recibida debido al ruido y al desvanecimiento por trayectos múltiples.

En todos los entornos inalámbricos, el RSSI puede ser expresado como la Ecuación 2.6 [27].

$$R_p = T_p + G_t + G_r - P_L \quad (2.6)$$

Donde:

R_p : Potencia recibida por el receptor en dBm.

T_p : Potencia transmitida dBm.

G_t : Ganancia de la antena del transmisor dBi.

G_r : Ganancia de la antena del receptor dBi.

P_L : Pérdida de trayectoria en dB.

2.6. Conclusiones

La gran cobertura, bajo consumo energético y la transmisión segura de datos hace de LoRa una tecnología óptima para la implementación de medidores inteligentes. Además, su capa física permite la configuración de diversos parámetros de transmisión como: ancho de banda, potencia, SF y tasa de codificación.

El protocolo de red LoRaWAN implementa funcionalidades como opciones de configuración para múltiples aplicaciones a través de clases; siendo la clase A la de menor uso energético, apropiado para aplicaciones como medición inteligente en una ciudad. Además, incluye dos niveles de seguridad: uno para red y otro para la aplicación a través de claves que permiten la encriptación de la información. Los mensajes son de dos tipos: *uplink* y *downlink*; los primeros enviados por los nodos al servidor de red por medio de *gateway*, y el segundo enviado por el servidor a un solo nodo.

El indicador del nivel de la señal RSSI obtenido en las campañas de medición, es usado para generar un modelo empírico; es importante el desarrollo de estos modelos ya que nos permiten conocer el comportamiento de la tecnología usada, en diversos ambientes y en diferentes condiciones.

Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se expone los principales trabajos de investigación sobre la tecnología [LoRa](#) así como su capa de red [LoRaWAN](#).

En el capítulo anterior se mencionó las ventajas que ofrece la tecnología [LoRa](#) con modulación [CSS](#) y su capa de red con funciones [MAC LoRaWAN](#) enfocado a [IoT](#). Entonces, en esta sección se presenta varios trabajos referentes a esta tecnología, cuyo principal objetivo es analizar el rendimiento y cobertura mediante pruebas de campo y simulaciones en varios ambientes y bajo diferentes condiciones. Existen varios trabajos que relacionan diferentes configuraciones de transmisión, así como la altura del *gateway* con el alcance máximo de [LoRa](#).

3.1. Trabajos relacionados con LoRa: capa red LoRaWAN

Existen varios trabajos referido a [LoRa](#) en donde se evalúa la cobertura de red de esta tecnología en un ambiente suburbano con viviendas residenciales de poca altura. En [\[28\]](#) evalúa el rendimiento de la capa física y datos mediante pruebas de campo y simulaciones, las pruebas fueron realizadas en un suburbio en París, donde el *gateway* estuvo ubicado en el segundo piso de una casa, mientras que el transmisor estaba ubicado en un automóvil. Durante las pruebas se utiliza una potencia de transmisión de 14 dBm y [SF](#) de 7, 9 y 12. Los resultados muestran que [LoRa](#) ofrece una cobertura de red eficiente de hasta 3 km en un área suburbana con viviendas residenciales densas y tanto el [SF](#) como la velocidad de datos tienen un impacto significativo en la cobertura de red.

Un aspecto importante para obtener un mayor alcance es la altura en la que se encuentra ubicado el *gateway*. En [\[14\]](#) se analiza la cobertura del equipo [LoRa](#) en la ciudad de Oulu, Finlandia ubicada en la orilla del mar. El nodo se ubicó en el techo de un automóvil y en el agua conectado al mástil del radio de un barco, mientras que la estación [LoRa](#) se ubicó en una torre a 24 metros sobre el nivel del mar. El transmisor se configuró con el máximo [SF](#) y potencia de 14 dBm. Los resultados obtenidos indican que la cantidad de paquetes entregados con éxito

supera el 80 % en distancias hasta 5 km, mientras que en el agua se alcanzó una distancia de 30 km con un porcentaje de paquetes entregados con éxito del 70 %.

En [29] propone un escenario rural y dos urbanos en Portugal para realizar las pruebas de campo y evaluar la tecnología [LoRa](#), con una referencia de altura a los puntos medidos de 34 m. El alcance obtenido en el ambiente rural fue de 5660 metros mientras que en los ambientes urbanos se obtuvo un alcance de aproximadamente 2000 metros. Este trabajo encuentra tres factores importantes que influye en el alcance de la señal: distancia, diferencia de elevación y obstáculos en la trayectoria de la señal.

Otro trabajo que evalúa el rango de transmisión es [21]. Se realizan ensayos de campo en la ciudad de Córdoba y Buenos Aires en Argentina. Los datos recopilados en las pruebas de campo permitieron realizar una estimación de cobertura RF a través de una simulación basada en resultados empíricos. En la ciudad de Córdoba considerada como un ambiente urbano se obtuvo una cobertura real de hasta 1.6 km, mientras que en la ciudad de Buenos Aires siendo considerado un ambiente densamente urbano se obtuvo una cobertura real de 1.1 km.

En áreas ricas en aplicaciones comerciales, formadas por varios edificios con múltiples pisos es importante evaluar el rendimiento de [LoRa](#). En [30] evalúa el desempeño de [LoRa](#) en un área urbana de alta densidad en Melbourne, Australia para penetrar hasta el nivel de la calle. Los resultados mostraron que la capacidad de [LoRaWAN](#) para rastrear a una persona a nivel de la calle es mucho menor de lo que se podría esperar, dado estudios anteriores en donde se reportan distancias de hasta 5 km en ambientes rurales. Sin embargo, en este trabajo se presenta una comunicación sin pérdidas con un radio de aproximadamente 200 m, mientras que la pérdida total de la transmisión se da alrededor de los 600 m.

En [17], se realiza un análisis de cobertura de las tecnologías [LPWAN](#) más destacadas cuyos ensayos de campo se realizaron usando la tecnología [LoRa](#) en la ciudad de Padua, Italia. El área de pruebas consiste en un entorno urbano, con edificios de oficinas y centro comerciales en ambos lados de la vía, e intersecciones con caminos secundarios regulados por semáforos y rotondas. El *gateway* se ubicó en la parte superior de un edificio de dos pisos, sin elevación de antena, en un área donde hay edificios más altos. Según los resultados se obtuvo un rango de cobertura nominal de 1.2 km, lo que demuestra que las redes [LPWAN](#) son aptas para complementar los estándares actuales de [IoT](#), que pueden beneficiarse enormemente de los enlaces de largo alcance.

Recientemente, se ha implementado una adopción cada vez más amplia de vehículos eléctricos, esto se traduce a nuevos requisitos en las comunicaciones de red. En [31], presenta la tecnología [LoRaWAN](#) como un candidato para las comunicaciones de EVehicles. Entonces, para las pruebas de campo la estación base [LoRaWAN](#) se coloca en la parte superior del techo de un edificio del campus de la Universidad de Brescia en Italia. El transmisor se encuentra sobre un Renault Zoe y ha sido configurado para transmitir la velocidad, la posición geográfica, la información acerca del estado de carga de la batería y la marca de tiempo de las muestras. Los resultados muestran que la cobertura [LoRaWAN](#) alcanza una distancia de 2 km, en un entorno



urbano con RSSI de aproximadamente -117 dBm.

3.2. Conclusiones

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre la tecnología LoRaWAN se caracterizan por medir la distancia de cobertura y PER, en varios ambientes y bajo diferentes condiciones. En los diferentes trabajos se destacan los siguientes factores que influyen en el alcance de la señal: distancia entre el nodo y *gateway*, diferencia de elevación y obstáculos en la trayectoria de la señal. Por otro lado, las variables de medición comúnmente usadas son: PER, RSSI y SNR.

La distancia máxima de cobertura sin obstáculos alcanza los 30 km en [14], sin embargo, en áreas densas urbanas se tiene una cobertura sin pérdidas únicamente hasta los 200 metros como indica el trabajo [30]. Aunque no existe un consenso claro del número de paquetes que se envían y configuraciones de transmisión, en [28] toma en cuenta el SF y la velocidad de datos como factores influyentes en la cobertura de red, por lo que es importante considerar como caso de estudio.

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se presentan aspectos técnicos de los equipos [LoRa](#), la configuración y metodología utilizada. El objetivo es ajustar un modelo de propagación basado en los valores de [RSSI](#) que se obtiene a partir de las campañas de medición dentro de la ciudad de Cuenca. Dicha ciudad se encuentra dividida por varios sectores con diferentes tipos de arquitectura y topología, por lo que es necesario elegir sectores claves que representen de forma correcta la ciudad, y así, poder describir el comportamiento de la tecnología [LoRa](#) dentro de la misma. Finalmente, se implementa un análisis estadístico de los datos obtenidos en las campañas de medición y la influencia en este proyecto de investigación.

4.1. Equipos

En esta sección, se describe el kit de Evaluación de [LoRa](#) utilizado para realizar el trabajo de campo y su configuración. También, se presenta el dispositivo controlador del transmisor Raspberry Pi, se ha implementado un segundo Raspberry Pi con la finalidad de que funcione como servidor. Se ha escogido tres sectores con diferentes tipos de arquitectura y topología para verificar el comportamiento de la tecnología [LoRa](#). Finalmente, se presenta la metodología para realizar las pruebas de campo y un análisis estadístico de los datos obtenidos.

4.1.1. Kit de Evaluación de LoRa - 900

El kit de evaluación [LoRa](#) se muestra en la Figura 4.1, que incluye un *gateway* y dos motas o nodos con el módulo RN2903. Este kit facilita las pruebas de cobertura y [DR](#) [32].

- **LoRa gateway:** es una placa de demostración fabricada para el uso de productos con módulos que utilizan transceptores RN de la tecnología [LoRa](#). El Microchip *LoRa gateway* provee la comunicación con el servidor de aplicación y la red [LoRa](#). La comunicación con el servidor se logra a través del protocolo [Transmission Control Protocol/Internet Protocol](#)

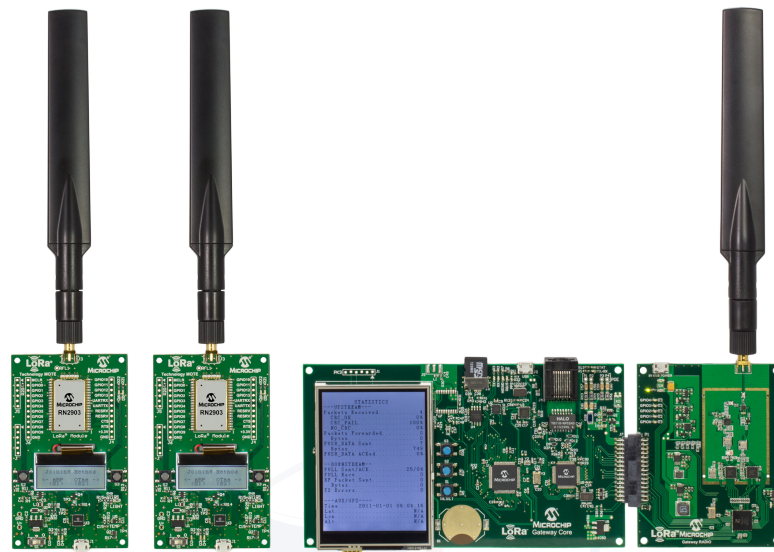


Figura 4.1: Kit de Evaluación de LoRa - 900 [2]

(TCP/IP) según lo admite el hardware de la placa de demostración. Microchip suministra múltiples placas *gateway* Radio, con su propia banda de frecuencia designada para admitir los módulos Microchip RN disponibles.

La placa de Radio mostrada en la Figura 4.2 en la parte derecha, captura todos los paquetes *uplink* utilizando los dos transceptores Semtech SEM1257 integrados y los envía al procesador de banda base SX1301 para la comunicación a través de [Serial Peripheral Interface \(SPI\)](#) a LoRa *gateway*. La placa LoRa *gateway* recibe la información capturada por la placa de radio y utilizando el PIC-24 con el dispositivo codificador (ENC624J600) convierte los paquetes en [TCP/IP](#), para luego ser enviados a través del conector ethernet.

- **RN2903 LoRa Motes:** es una placa demostrativa que proporciona acceso al módulo [LoRa](#) a través de un chip puente USB-UART y admite conexiones a todos los pines del módulo mediante puertos GPIO (ver Figura 4.3). Existen dos modos de operación: USB y batería.

Cuando la placa Mote está conectada a un computador a través de USB, el dispositivo funciona en modo USB. El PIC18LF45K50 funciona como puente USB-UART, de esta forma se puede emitir comandos directamente al módulo.

Cuando la placa está alimentada por baterías AAA, entonces la placa Mote está en modo batería. El PIC18LF45K50 puede ejecutar funciones personalizadas y emitir directamente comandos ASCII al módulo [LoRa](#) a través de la interfaz UART.

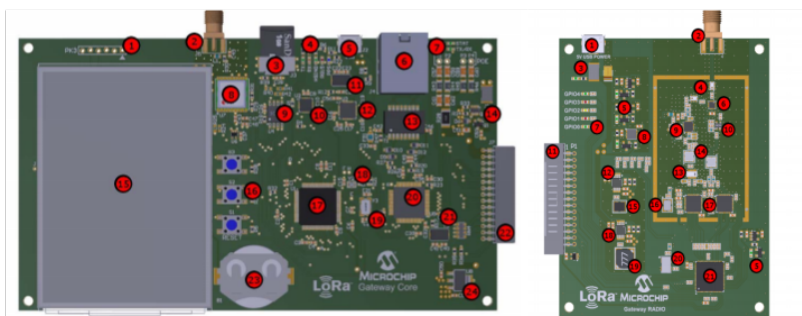


Figura 4.2: Gateway LoRa [3]

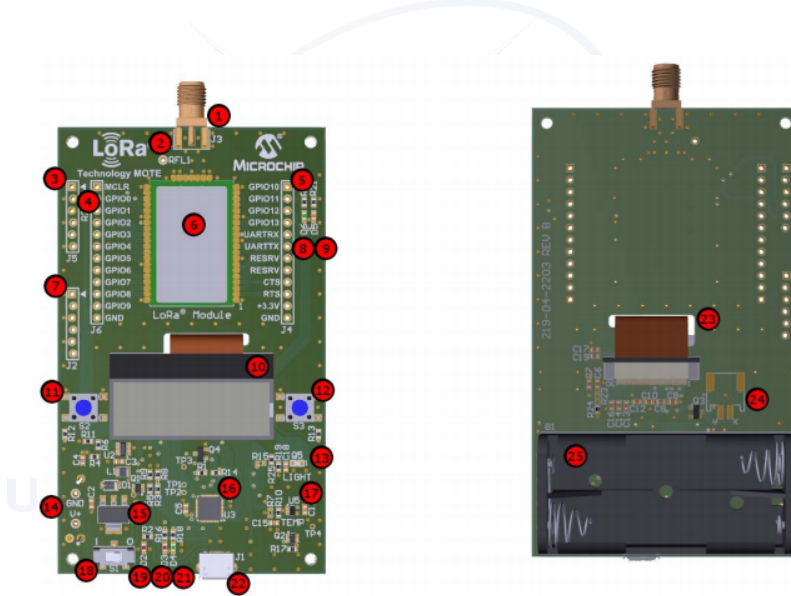


Figura 4.3: LoRa Motes [4]

4.1.2. Raspberry Pi 3 modelo B

Raspberry Pi es una computadora del tamaño de una tarjeta de crédito que corre en Linux, desarrollado por la Fundación Raspberry Pi. Fue diseñada para enseñar programación a gente joven, pero gracias a su tamaño y bajo costo ha sido usado para un sin fin de proyectos interesantes en todo el mundo por sus posibilidades de programación y conexión.

En el presente trabajo se utilizaron dos Raspberry Pi modelo B, el primero para enviar los comandos [MAC](#) al mote RN2903 mediante el modo USB y el segundo está implementado como el servidor de red.

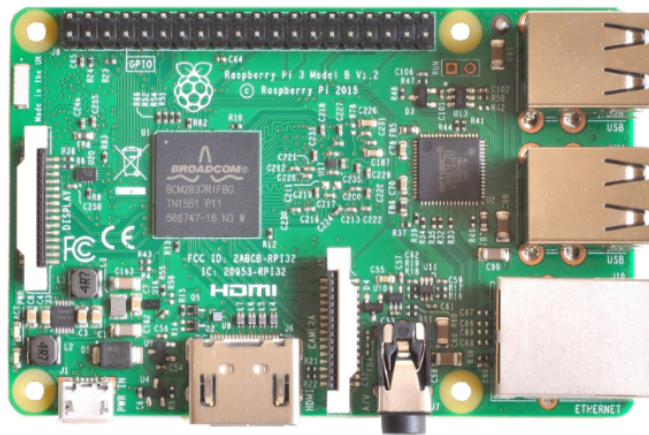


Figura 4.4: Raspberry Pi 3 modelo B [5]

4.1.3. Ubicación de Equipos

En la Figura 4.5 presenta la ubicación de los equipos durante las pruebas de campo. El mote LoRa recibe los comandos MAC del primer Raspberry Pi a través de la interfaz UART para empezar la transmisión de los paquetes ASCII. El receptor está formado por el *gateway*, el cual reenvía los paquetes mediante TCP/IP al servidor de red que está constituido por un segundo Raspberry Pi.



Figura 4.5: Diagrama de bloques de los equipos.

4.1.4. Configuración de Equipos

El kit de evaluación LoRaWAN tiene implementado varias funciones; sin embargo, se realizaron varias configuraciones y modificaciones para ajustar los parámetros de transmisión y el servidor de red.

- **Configuración del Receptor:** el Raspberry Pi funciona como servidor, el cual recibe los paquetes TCP/IP enviados por el módulo LoRa gateway, decodifica y los guarda en un archivo .csv. La IP del servidor es: 192.168.1.1/24. La dirección de red en el módulo LoRa gateway hacia el servidor de red es: 192.168.1.125. En el Apéndice A se detalla el código utilizado.

- **Configuración del Transmisor:** el circuito que se presenta en la Figura 4.6 es el encargado de controlar el número de paquetes a enviar, además los leds indican el tiempo que ha transcurrido durante cada transmisión. El Raspberry y el circuito están conectados a través de la interfaz GPIO, el cual se encuentra programado en Java al igual que el mote LoRa. Los detalles de la configuración del transmisor se exponen en el Apéndice A.

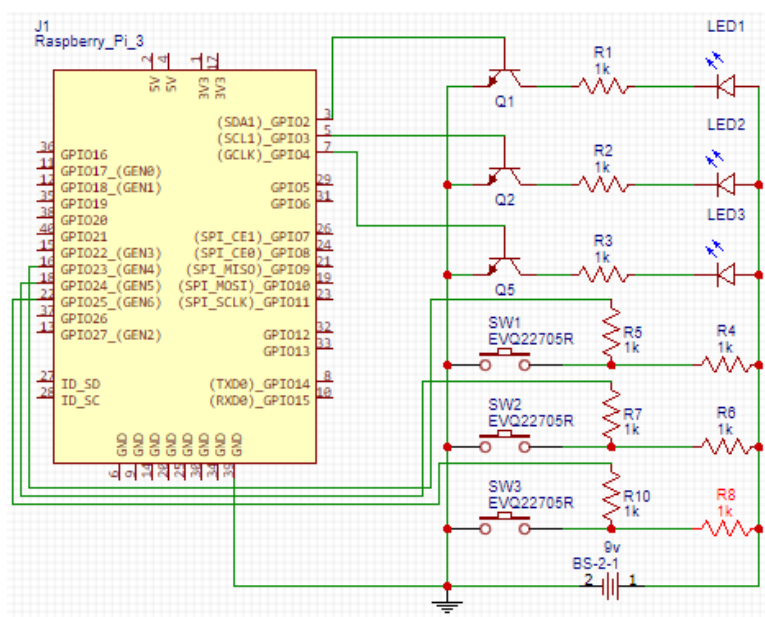


Figura 4.6: Circuito de control.

4.2. Ambientes seleccionados para las pruebas de campo

La contribución de este trabajo es el ajuste de un modelo de propagación que facilite el desarrollo de medición inteligente con tecnología LoRaWAN en ambientes urbanos. Dado que la ciudad de Cuenca cuenta con varios sectores con una gran mezcla de estilos de construcción y decoración, se ha escogido tres zonas representativas de la ciudad.

4.2.1. Sector Totoracocha

Se eligió el sector de Totoracocha ya que está constituido por viviendas residenciales de poca altura, generalmente dos pisos. Además, el tipo de vivienda que se encuentra en esta zona es de ladrillo o bloque. El sector no tiene vegetación, pero existen varios parques recreativos con árboles de 1 y 3 metros de altura.

La estación terrena de Etapa EP se encuentra ubicada en la calle Rumi-Urco, el *gateway* fue ubicado sobre una de las torres de dicha empresa a una altura de aproximadamente 18 metros.

En la Figura 4.7 se puede observar de color verde la ubicación del mismo. La topografía del terreno es un factor importante cuando se habla de cobertura, pero el comportamiento del perfil de elevación es cambiante en el sector de Totoracocha, por lo que se ha visto conveniente dividir en cuatro zonas como muestra la Figura 4.7.

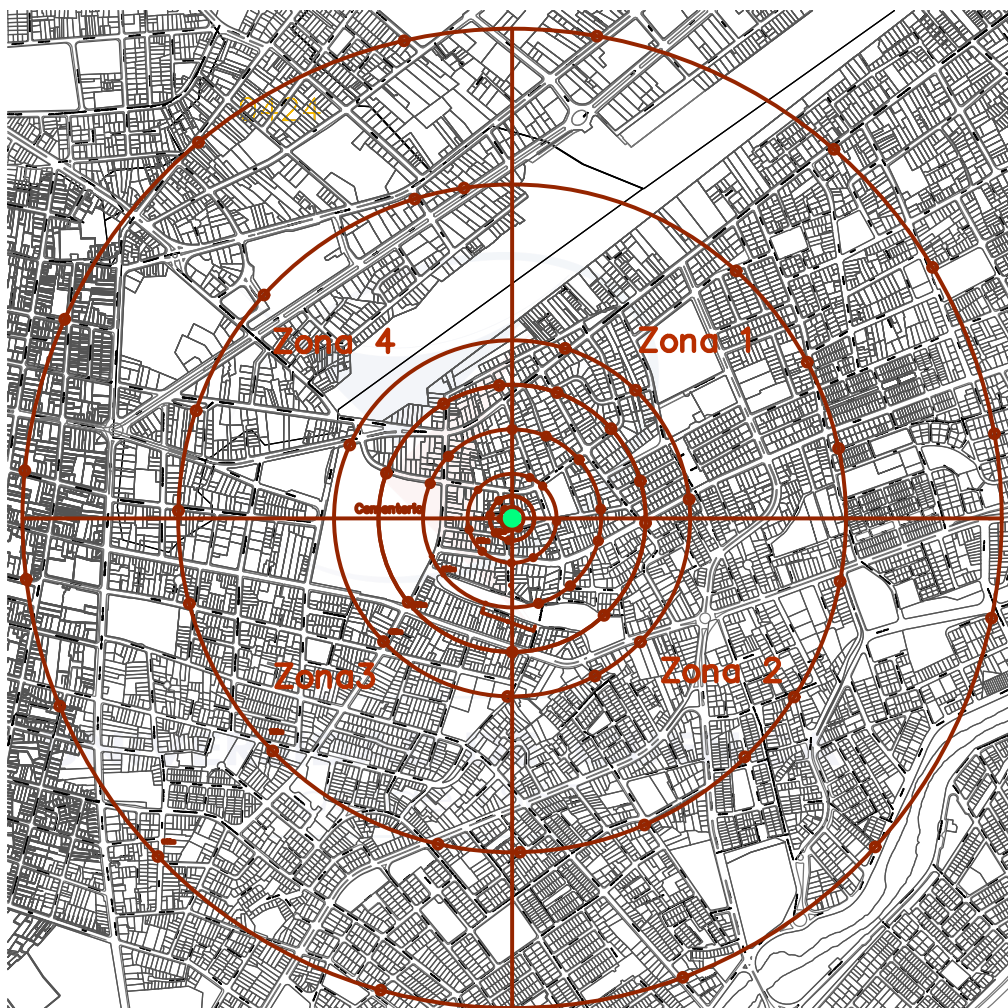


Figura 4.7: Sector Totoracocha.

El esquema de alturas para las cuatro zonas se presenta en la Figura 4.8, en la zona 1 se puede ver un comportamiento casi lineal por debajo de los 2515 metros sobre el nivel del mar. Mientras que, en la zona 2 se tiene un esquema de elevación cuya pendiente disminuye notablemente desde la posición del *gateway* hasta el punto donde no existe cobertura. En la zona 3 no posee una pendiente continua; sin embargo, en la zona 4 claramente la pendiente

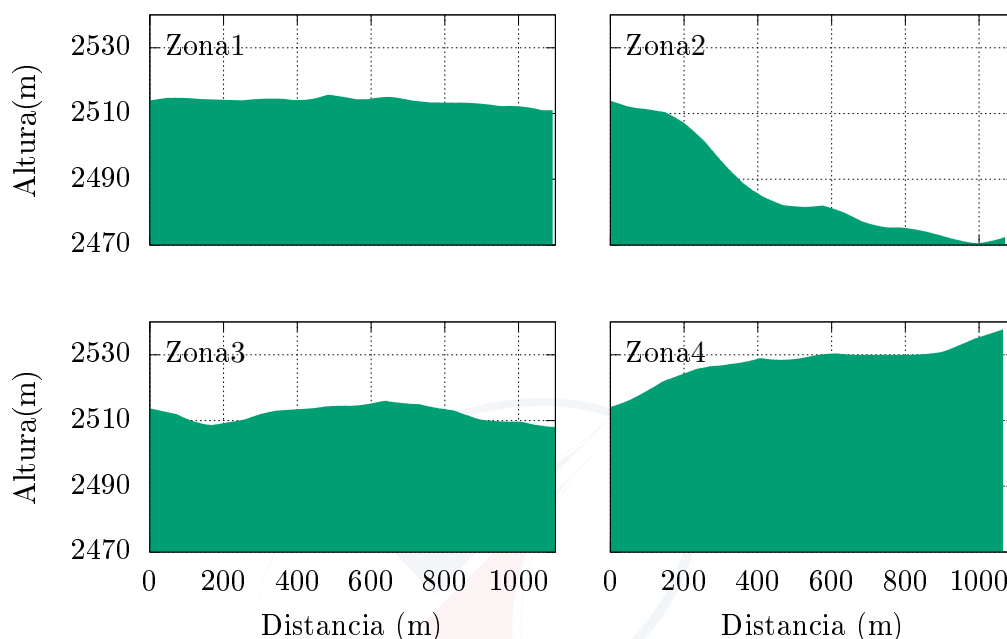


Figura 4.8: Perfil de elevación sector Totoracocha.

aumenta con una altura de 2514 metros sobre el nivel del mar en la posición del *gateway* y 2538 metros en el punto máximo de cobertura.

4.2.2. Sector Centro Histórico

El centro de la ciudad tiene un aire colonial, con varios locales comerciales e iglesias de gran altura hechas con materiales como: ladrillo, mármol y piedra. Las calles son perpendiculares unas con otras a manera de una cuadrícula.

Sobre la biblioteca municipal a una cuadra del parque Calderón, se encuentra las torres de ETAPA EP donde fue ubicado el *gateway* a una altura de 25 m aproximadamente sobre el nivel de la calle. Un factor importante que genera consecuencias negativas en la calidad de la señal es el tipo de material con el que se encuentran contruidos los edificios y viviendas. La arquitectura del Centro Histórico aparentemente es homogénea así como su topología; sin embargo, existen diferentes tipos de materiales de construcción. Para verificar si el comportamiento de la señal es el mismo en todas las direcciones del sector mencionado, se ha procedido a dividir en 8 zonas como muestra la Figura 4.9.

El perfil de elevación de cada zona se presenta en la Figura 4.10. Se puede observar que la

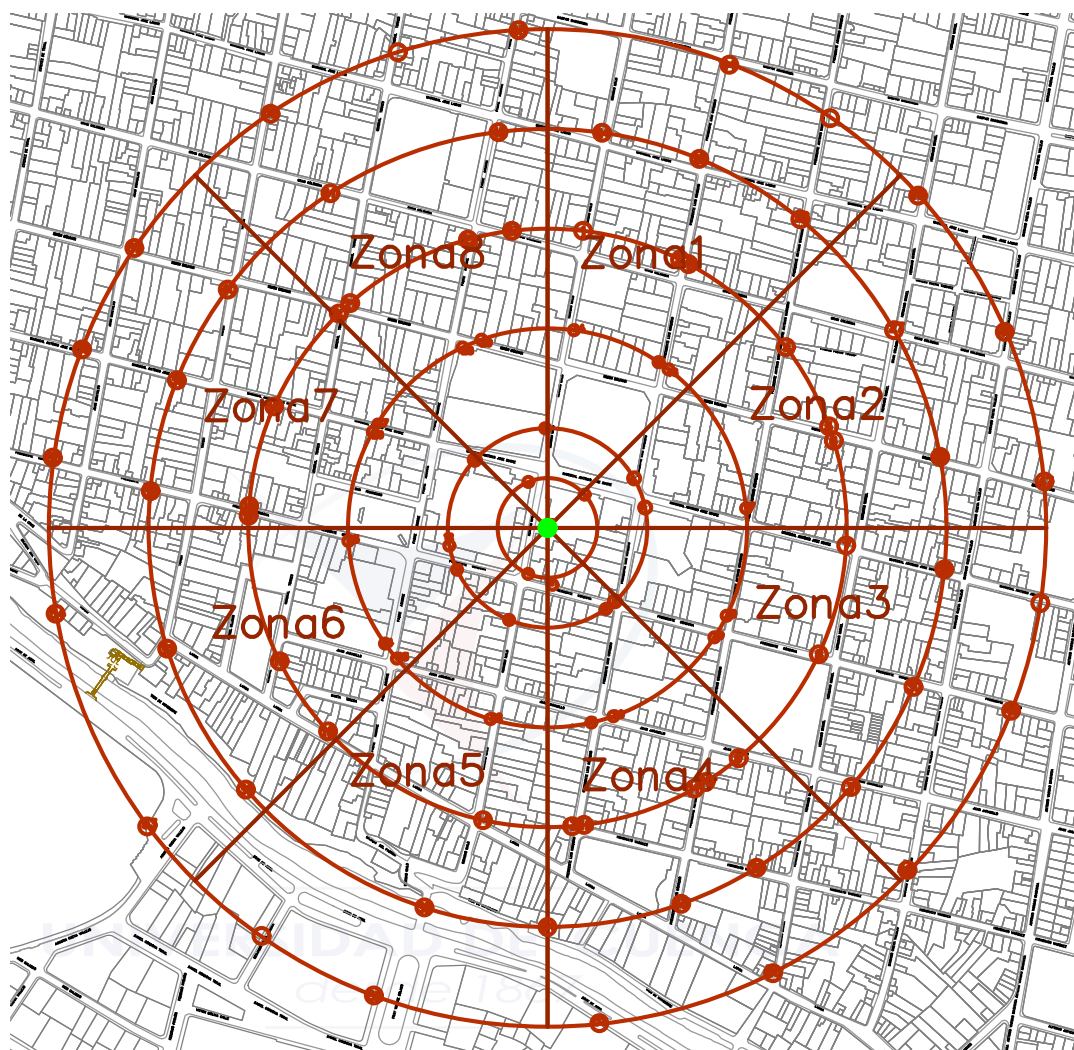


Figura 4.9: Sector Centro Histórico.

zona 1, 7 y 8 no tienen un cambio brusco en la pendiente de elevación; sin embargo, la zona 2, 3, 4, 5 y 6 presenta una reducción significativa especialmente a partir de los 350 metros de distancia con respecto al *gateway*.

4.2.3. Sector Hotel Oro Verde

El sector del Hotel Oro Verde está formado por varios edificios residenciales de gran altura, construidos con ladrillo o bloque. Cabe mencionar que existen edificios unicamente sobre la Avenida Ordoñez Lasso y algunas calles transversales, además no existe abundante tránsito

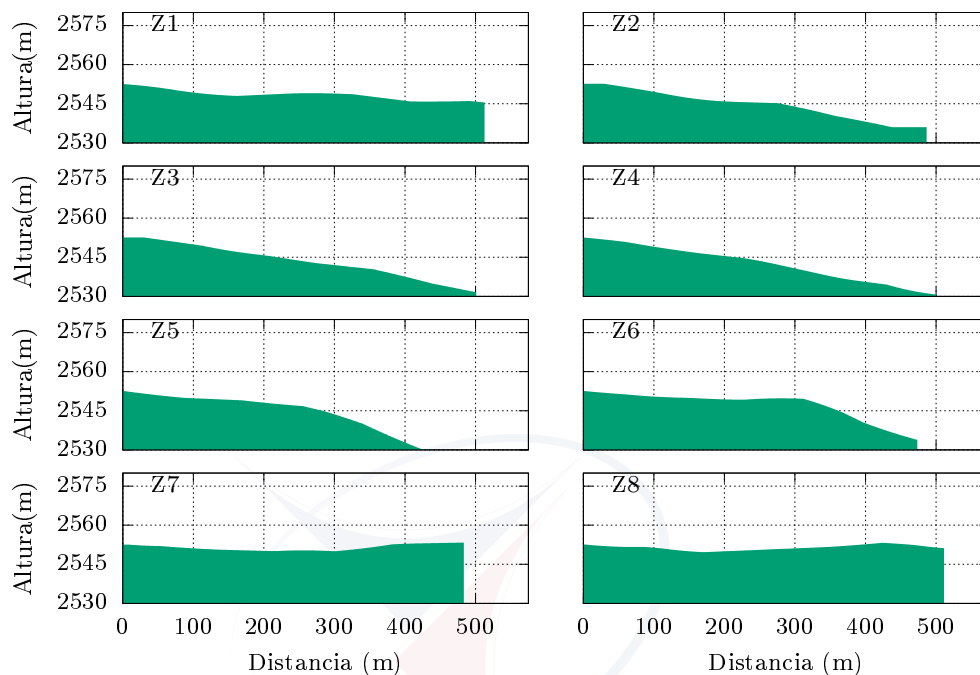


Figura 4.10: Perfil de elevación sector Centro Histórico.

peatonal.

El *gateway* fue ubicado en la terraza del edificio Montecarlo, ubicado en la Avenida Ordoñez Lasso y Los Nogales mostrado de color verde en la Figura 4.11, con una altura de aproximadamente 35 metros sobre el nivel de la calle.

Este sector se dividió en dos zonas como muestra la Figura 4.11 ya que la zona 2 está constituida en su mayoría por edificios de gran altura, mientras que la zona 1 por viviendas residenciales y edificios comerciales sin mayor elevación. Además, es importante revisar la topografía del lugar, en la Figura 4.12 se presenta el perfil de elevación para ambas zonas, se puede apreciar que la zona 1 presenta un decrecimiento en la elevación de aproximadamente 14 metros hasta la distancia de máxima cobertura y la zona 2 un crecimiento de aproximadamente 20 metros.

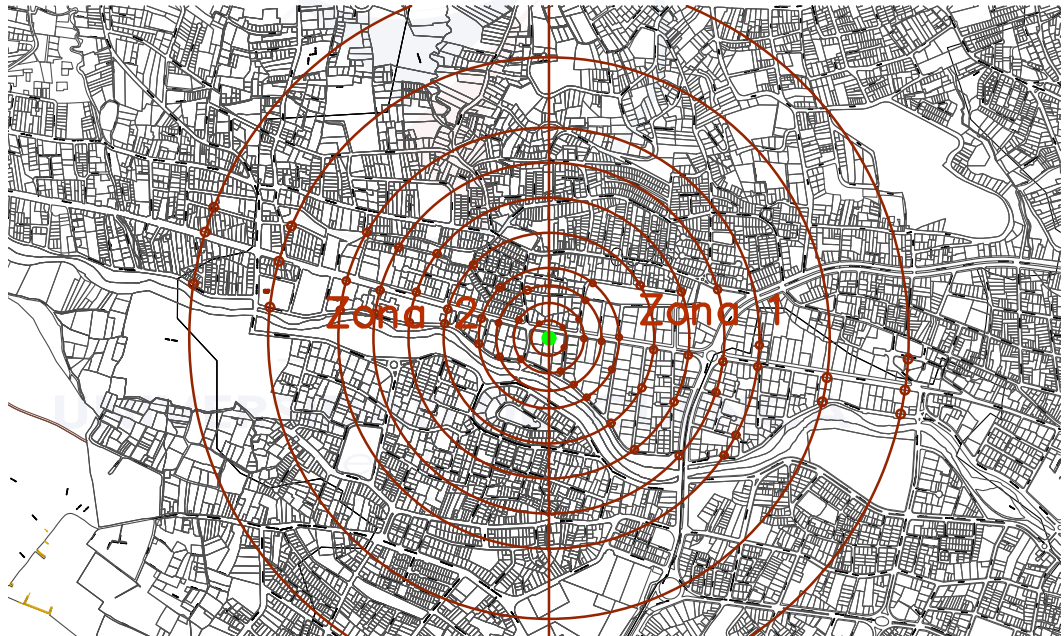


Figura 4.11: Sector Oro Verde.

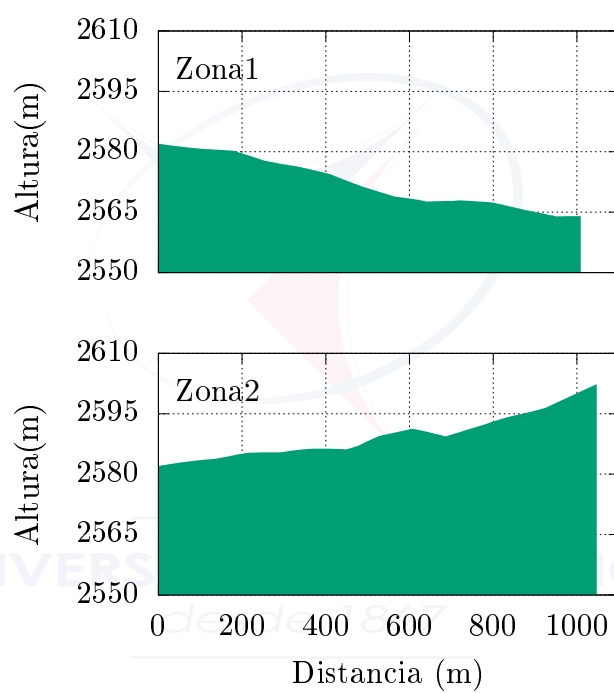


Figura 4.12: Perfil de elevación sector Oro Verde.

4.3. Procedimiento de Medición

Las pruebas de campo consisten en enviar un conjunto de paquetes configurados con diferentes *payload*: 2, 7 y 11 bytes, además SF de 7 y 10, dichas pruebas se realizaron en tres sectores representativos de la ciudad de Cuenca: el primero ubicado en el barrio Totoracocha, el segundo en el Centro Histórico de Cuenca y el último en el sector del Hotel Oro Verde, como se explicó en la Sección 4.2.

La disposición de los equipos para dos sectores fue como se observa en la Figura 4.13, mientras que en la zona del sector Oro Verde el *gateway* se ubicó sobre uno de los edificios. El transmisor se ubicó en una estructura de hierro de 1.5 m de altura, debido al reglamento emitido por la CENTROSUR (Empresa Distribuidora de Energía Eléctrica) para cualquier tipo de medidor [33].

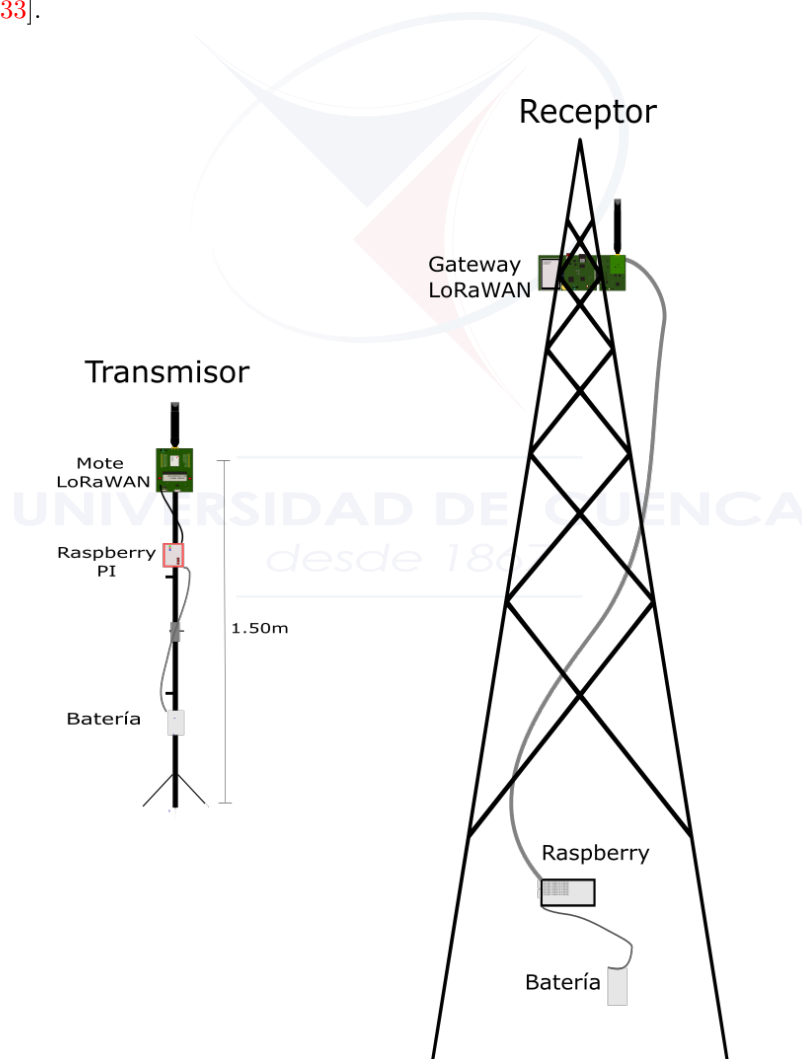


Figura 4.13: Ubicación de los equipos.

En el Apéndice A se analizó la cantidad de paquetes óptima para enviar en cada transmisión. Se hicieron transmisiones con diferente número de paquetes y atenuación, dando como resultado que el PER es constante en transmisiones entre 300 y 1000 paquetes.

- Sector Totoracocha: se realizó una prueba previa para verificar a que distancia el RSSI es menor a -110 dBm, se encontró que a una distancia de 500 metros el indicador RSSI ya no es confiable, como se indica en el Apéndice A. En la Figura 4.7, se puede observar al sector de Totoracocha, donde se trazaron círculos para definir la distancia exacta donde se ubicará el transmisor. Se ubicaron 90 puntos de manera estratégica para que el transmisor pueda estar junto a la pared exterior de la vivienda a una altura de 1.5 metros, cuyo círculo límite corresponde a la distancia donde se pierde la cobertura en su totalidad.
- Sector Centro Histórico: la arquitectura de este sector se caracteriza por construcciones coloniales de gran altura, además se tiene gran tráfico vehicular y peatonal, por lo que el área de cobertura disminuirá con respecto al resto de sectores. En la Figura 4.9 se puede observar al sector dividido por círculos, de acuerdo a la ubicación del transmisor. Se definieron 90 puntos donde se ubicará el transmisor, de manera que pueda estar pegado a la pared exterior del edificio o iglesia.
- Sector Hotel Oro Verde: este sector se caracteriza por edificios de gran altura, el gateway fue ubicado sobre el edificio Montecarlo a una altura de 35 metros aproximadamente sobre el nivel de la calle. Los puntos donde se ubica el transmisor es a lo largo Avenida Ordóñez Lasso y sus calles adyacentes como se observa en la Figura 4.11, debido a que son los únicos lugares donde existen edificios de gran altura. Se definieron 60 puntos de manera que el transmisor pueda estar ubicado en la parte frontal de los edificios.

4.4. Análisis Estadístico

4.4.1. Medidas numéricas

Las campañas de medición arrojan un conjunto de datos que deben ser resumidos para presentar características prominentes. Para ello, es necesario el uso de métodos de estadística descriptiva. Uno de los métodos que se usan para el análisis de los datos recopilados es el cálculo de medidas numéricas, tales como medias, medidas de variabilidad y coeficientes de correlación [34].

- Medias: una característica importante de un conjunto de datos es su localización, en particular su centro. Se puede distinguir la media aritmética o promedio, mediana y la moda.
- Medidas de Variabilidad: diferentes muestras pueden tener medias idénticas y aún así diferir en otras características. Las medidas de variabilidad muestran el grado de dispersión

de los datos en torno al centro. La medida más simple de variabilidad es el rango, el cual es la diferencia entre los valores muestrales más grande y más pequeño. La varianza se define como el promedio de los cuadrados de las desviaciones de los datos alrededor de su media. La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza.

4.4.2. Intervalos de Confianza

El intervalo de confianza se crea cuando existe gran probabilidad de que este contenga el parámetro de interés. La probabilidad se mide usando el coeficiente de confianza $(1 - \alpha)$.

Intervalos de Confianza para muestras grandes: cuando el tamaño de muestras es grande con una distribución aproximadamente normal, entonces se puede usar la Ecuación 4.1 para la construcción del intervalo de confianza.

$$T = media \pm z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Donde:

n : Tamaño de la muestra.

σ : Desviación estándar.

$z_{\alpha/2}$: Valor correspondiente a un área $\alpha/2$. Los valores que comunmente se usan para los intervalos de confianza se pueden ver en la Tabla 4.4.2.

Coeficiente de Confianza	α	$\alpha/2$	$z_{\alpha/2}$
.90	.10	.05	1.645
.95	.05	.025	1.96
.98	.02	.01	2.33
.99	.01	.005	2.58

Tabla 4.1: Valores de z comunes. [7]

Intervalos de Confianza para muestras pequeñas: cuando la muestra es pequeña es necesaria la distribución t Student. Entonces la Ecuación 4.2 se usa para calcular el intervalo de confianza.

$$T = media \pm t * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

El valor apropiado de t se halla en la tabla de distribución t Student, con $n-1$ grados de libertad y el nivel de confianza deseado.



4.4.3. Comparación de los datos obtenidos en las campañas de medición.

En cada punto de transmisión se enviaron paquetes con diferente *SF* y *payload*, por esta razón se usa la prueba de Kruskal-Wallis para definir si cada configuración posee alguna relación con la otra. Esta prueba es un método no paramétrico que se usa para saber si varias muestras independientes provienen o no de la misma población. Si existe al menos una configuración diferente entonces se usa la prueba de Dunn, para informar los resultados entre comparaciones múltiples por pares [35] [36].

4.5. Conclusiones

Los equipos de LoRa presenta ventajas en cuanto a la configuración de sus parámetros que pueden variar para diferentes tipos de aplicaciones. El nodo es controlado por la interfaz UART, y este a su vez es usado por el dispositivo Raspberry Pi 3 modelo B que tiene dos funciones: enviar comandos MAC y como servidor de red. Los ambientes seleccionados para realizar las campañas de medición fueron seleccionados dentro del casco urbano de la ciudad de Cuenca; se eligieron tres sectores con diferente tipo de arquitectura cada uno, de esta manera se podrá realizar de mejor manera el ajuste de un modelo de propagación que facilite el desarrollo de medición inteligente con tecnología LoRaWAN.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las campañas de medición y el ajuste logarítmico a un modelo de pérdidas de trayectoria para el uso de la tecnología [LoRa](#) en diferentes sectores de la ciudad de Cuenca.

Como se planteó en la Sección [4.4.3](#) se realizó el análisis estadístico de correlación de los datos obtenidos con cada una de las configuraciones de transmisión, esto con el fin de verificar si es necesario tomar en cuenta el *payload* y *SF* dentro del modelo de pérdidas de trayectoria planteado en la Sección [2.5](#). El objetivo principal de este modelo es realizar estimaciones de cobertura y simulaciones para facilitar la implementación de aplicaciones como la medición inteligente en ambientes urbanos.

Por otro lado, las pruebas de campo se realizaron en tres sectores de la ciudad de Cuenca como se menciona en la Sección [4.2](#). Para ajustar el modelo matemático, cada sector fue dividido por zonas según su topología y arquitectura. Finalmente, se propone un modelo general para cada sector, esto con el fin de comparar que tanto varía con el modelo de cada zona. Es importante mencionar que los valores fiables de [RSSI](#) deben ser mayores a -110 dBm, como se menciona en el Apéndice [A](#).

5.1. Comparación estadística

Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis y posteriormente la prueba de Dunn entre las diferentes configuraciones de transmisión como se indicó en la Sección [4.4.3](#). El valor de P obtenido en cada comparación se utiliza para calcular la probabilidad de error mediante la distribución normal. Entonces, con un valor $P < 0,02$ se rechaza la hipótesis nula; es decir no existe relación [\[37\]](#).

5.1.1. Sector Centro Histórico

En las Tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 se presenta los resultados de la prueba de Dunn para cada una de las zonas en las que se dividió el sector del Centro Histórico. Se puede observar que no existen valores P menores a 0.02 en ninguna de las combinaciones, por lo que se concluye que existe relación entre cada configuración. Entonces, no es necesario realizar un ajuste en el modelo tomando en cuenta diferentes *SF* y *payload* para este sector.

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.1679				
SF10-PL11	0.1867	0.4723			
SF2-PL2	0.1867	0.4723	0.5000		
SF2-PL7	0.0986	0.3771	0.3510	0.3510	
SF2-PL11	0.1503	0.4723	0.4447	0.4447	0.4038

Tabla 5.1: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 1

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.1877				
SF10-PL11	0.1152	0.3772			
SF7-PL2	0.4585	0.1609	0.0962		
SF7-PL7	0.5000	0.1877	0.1152	0.4585	
SF7-PL11	0.2758	0.0784	0.0440	0.3090	0.2758

Tabla 5.2: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 2

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3084				
SF10-PL11	0.3084	0.1584			
SF7-PL2	0.3445	0.4601	0.1839		
SF7-PL7	0.2418	0.4207	0.1149	0.3820	
SF7-PL11	0.2418	0.4207	0.1149	0.3820	0.5000

Tabla 5.3: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 3

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3155				
SF10-PL11	0.4476	0.3539			
SF7-PL2	0.3327	0.1807	0.2785		
SF7-PL7	0.3327	0.1807	0.2785	0.5000	
SF7-PL11	0.2506	0.1245	0.2003	0.4051	0.4051

Tabla 5.4: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 4

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3750				
SF10-PL11	0.3750	0.5000			
SF7-PL2	0.2263	0.3261	0.3261		
SF7-PL7	0.2708	0.3783	0.3783	0.4468	
SF7-PL11	0.3363	0.4514	0.4514	0.3776	0.4293

Tabla 5.5: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 5

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4678				
SF10-PL11	0.2094	0.2334			
SF7-PL2	0.4678	0.4358	0.1869		
SF7-PL7	0.2334	0.2094	0.0623	0.2589	
SF7-PL11	0.3064	0.3322	0.4141	0.2815	0.1236

Tabla 5.6: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 6

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3530				
SF10-PL11	0.3055	0.4478			
SF7-PL2	0.4941	0.3734	0.3299		
SF7-PL7	0.3089	0.4359	0.4824	0.3292	
SF7-PL11	0.4766	0.3902	0.3460	0.4840	0.3439

Tabla 5.7: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 7

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.2558				
SF10-PL11	0.3538	0.3987			
SF7-PL2	0.4256	0.2206	0.3038		
SF7-PL7	0.1742	0.3987	0.3038	0.1522	
SF7-PL11	0.2558	0.5000	0.3987	0.2206	0.3987

Tabla 5.8: Valores P del Test de Dunn Centro Histórico Zona 8

Para determinar si las distribuciones de cada una de las zonas en el Centro Histórico son estadísticamente iguales, se considera las configuraciones de transmisión de cada zona de este sector como parte de la misma población de análisis. Los resultados del *test* de Dunn se muestran en la Tabla 5.9.

Los valores P mostrados con un asterisco (*) indica que no existe relación entre las zonas, caso contrario no se rechaza la hipótesis nula.

Para verificar los resultados obtenidos en el *test* de Dunn, se realizó el ajuste logarítmico de los valores de RSSI para la zona 2 y 3, con un valor P de 0.3702. Se puede constatar en la Figura 5.1 que dichas zonas se encuentran fuertemente relacionadas.

P	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
Z2	0.1582						
Z3	0.0854	0.3702					
Z4	0.0266	0.1994	0.3033				
Z5	0.1220	0.0201*	0.0077*	0.0015*			
Z6	0.3119	0.3448	0.2395	0.1187	0.0710		
Z7	0.0041*	0.0003*	0.0001*	0.0000*	0.0811	0.0033*	
Z8	0.0002*	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0053*	0.0002*	0.0689

Tabla 5.9: Valores P del Test de Dunn entre diferentes zonas en el Centro Histórico

Por otro lado, en la zona 2 y zona 8 se obtuvo un valor P de 0, este resultado se puede corroborar en el ajuste logarítmico mostrado en la Figura 5.2, donde se observa una gran diferencia en ambos modelos.

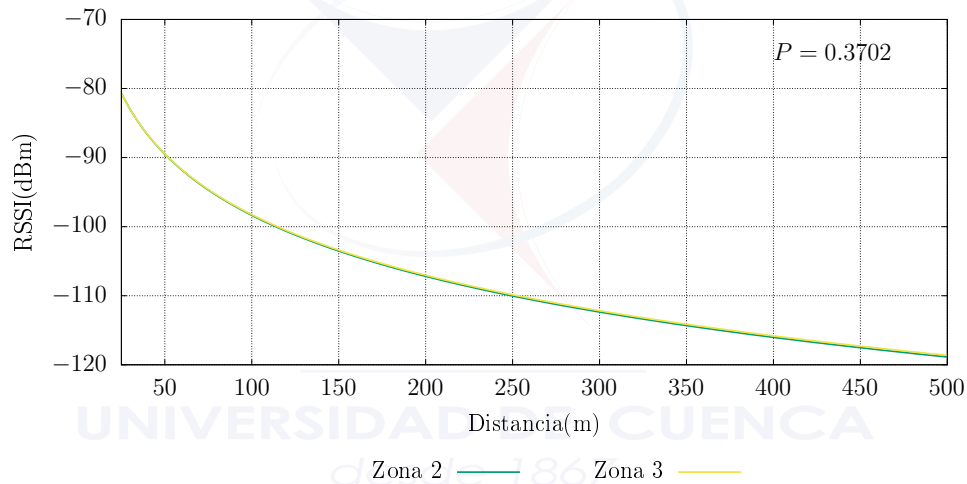


Figura 5.1: Modelo de RSSI entre zona 2 y zona 3 con $P = 0,3702$.

5.1.2. Sector Totoracocha

En las Tablas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, se presenta los resultados del test de Dunn para las cuatro zonas en el sector de Totoracocha tomando en cuenta las diferentes variaciones de SF y payload. Los valores P rechazan la hipótesis nula, por lo que no es necesario modificar el modelo para diferentes valores de SF y payload.

En la Tabla 5.14 se muestran los valores P entre las cuatro zonas del sector de Totoracocha. Se puede observar que no existe relación entre la zona 3 y 4 con un valor P de 0.0045. Para verificar los resultados obtenidos en el test de Dunn, se procedió a generar el ajuste logarítmico de RSSI.

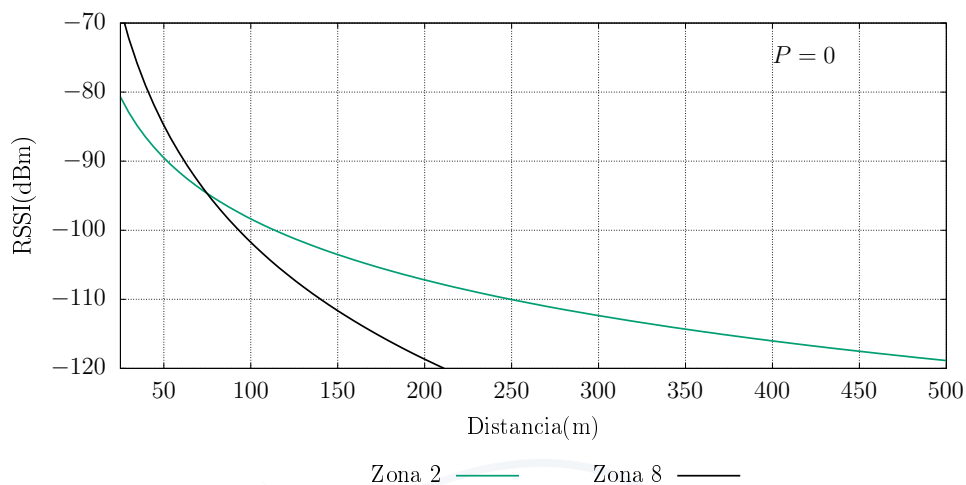


Figura 5.2: Modelo de RSSI entre zona 2 y zona 8 con $P = 0$.

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3875				
SF10-PL11	0.2375	0.3341			
SF7-PL2	0.1140	0.1789	0.3117		
SF7-PL7	0.1284	0.1981	0.3374	0.4715	
SF7-PL11	0.0845	0.1380	0.2544	0.4326	0.4047

Tabla 5.10: Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 1

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4432				
SF10-PL11	0.4644	0.4786			
SF7-PL2	0.3807	0.3276	0.3472		
SF7-PL7	0.2961	0.2487	0.2660	0.4082	
SF7-PL11	0.3212	0.2719	0.2899	0.4362	0.4715

Tabla 5.11: Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 2

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3196				
SF10-PL11	0.2638	0.4352			
SF7-PL2	0.1425	0.0664	0.0491		
SF7-PL7	0.1211	0.0544	0.0397	0.4625	
SF7-PL11	0.1664	0.0804	0.0602	0.4625	0.4253

Tabla 5.12: Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 3

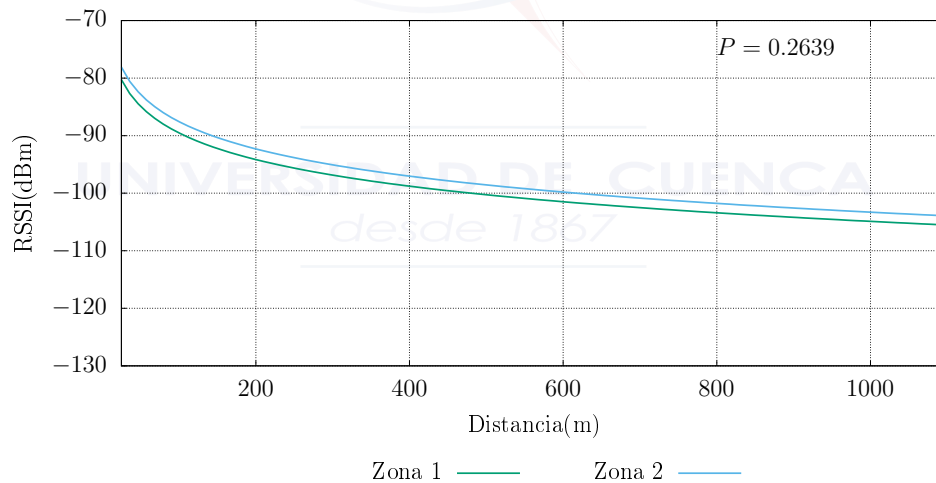
P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3113				
SF10-PL11	0.4533	0.3538			
SF7-PL2	0.1697	0.3148	0.1997		
SF7-PL7	0.2125	0.3727	0.2467	0.4396	
SF7-PL11	0.2164	0.3777	0.2508	0.4346	0.4949

Tabla 5.13: Valores P del Test de Dunn Totoracocha Zona 4

En la Figura 5.4, se puede observar una diferencia de 8dB en la distancia de 1100 metros para la zona 3 y 4. Mientras que, en la Figura 5.3 no existe una diferencia notable entre la zona 1 y 2, cuyo valor P es de 0.2639. Estos resultados corroboran los datos obtenidos en el *test* de Dunn.

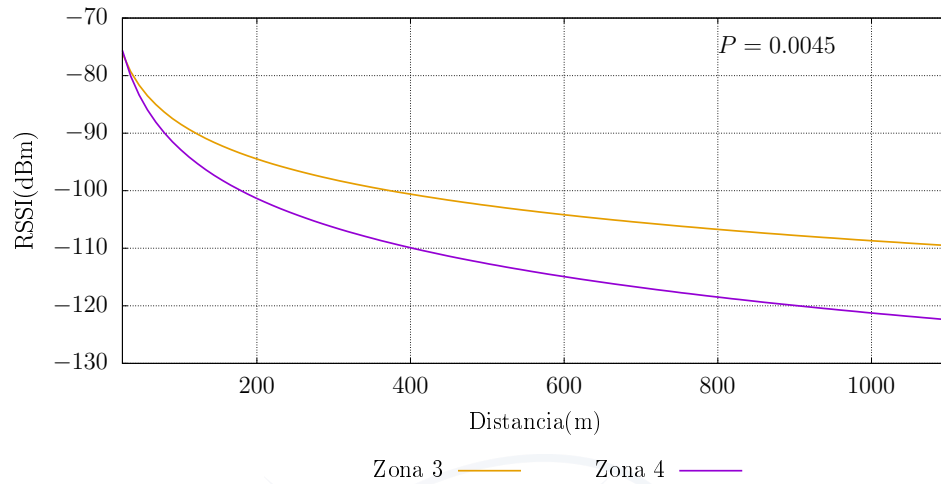
P	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Zona 2	0.2639		
Zona 3	0.1092	0.2710	
Zona 4	0.0774	0.0205	0.0045*

Tabla 5.14: Valores P del Test de Dunn entre diferentes zonas en Totoracocha


Figura 5.3: Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 2 con $P=0.3280$

5.1.3. Sector Oro Verde

De la misma manera que las Secciones 5.1.1 y 5.1.2, se realizó el test de Dunn entre las diferentes configuraciones de transmisión en cada zona del sector Oro Verde como se muestra


Figura 5.4: Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 4 con $P=0.0116$

en las Tablas 5.15 y 5.16. Cada configuración con diferente SF y payload rechazan la hipótesis nula, por lo que no es necesario realizar una modificación en el modelo.

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4503				
SF10-PL11	0.4573	0.4929			
SF7-PL2	0.4221	0.4715	0.4644		
SF7-PL7	0.4362	0.4858	0.4786	0.4858	
SF7-PL11	0.4362	0.4858	0.4786	0.4858	0.5000

Tabla 5.15: Valores P del Test de Dunn Sector Oro Verde Zona 1

P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4138				
SF10-PL11	0.4394	0.3556			
SF7-PL2	0.4053	0.3237	0.4653		
SF7-PL7	0.3637	0.2856	0.4223	0.4566	
SF7-PL11	0.4739	0.3885	0.4653	0.4308	0.3885

Tabla 5.16: Valores P del Test de Dunn Sector Oro Verde Zona 2

Para determinar si las zonas de este sector tienen distribuciones estadísticamente iguales, se ha considerado las configuraciones de transmisión de cada zona como parte de la misma población. En el *test* de Dunn se obtuvo un valor P de 0.0013 entre la zona 1 y 2 de este sector, por lo que ambas zonas no se están relacionadas. Sin embargo, para verificar este resultado se procedió a realizar el ajuste logarítmico de los valores de RSSI como se muestra en la figura

5.5, se puede observar una diferencia de 18 dB aproximadamente en los primeros 50 metros y 5 dB en el punto de alcance máximo.

Aunque el resultado del *test* de Dunn presenta una gran diferencia entre las dos zonas de este sector, en el ajuste logarítmico no se encuentra mayor diferencia.

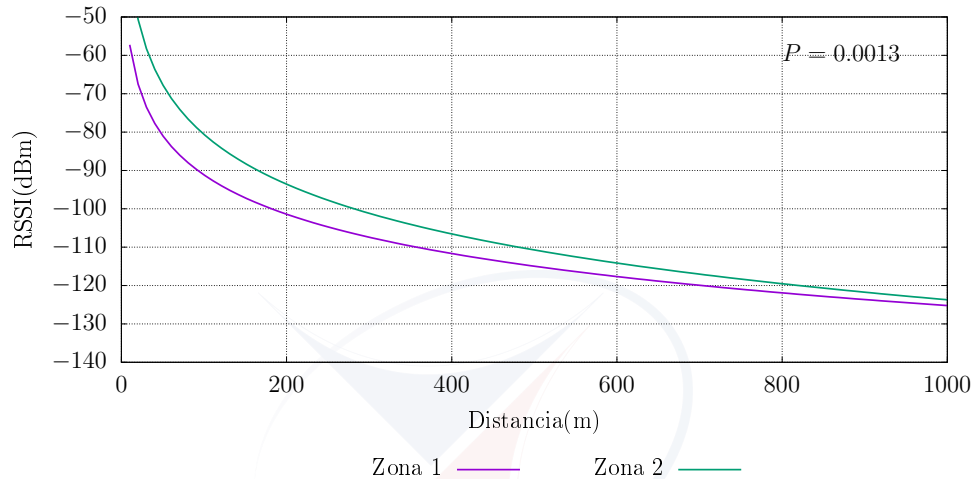


Figura 5.5: Modelo de RSSI entre zona 1 y zona 2 con $P=0.0013$

5.2. Ajuste Logarítmico de los valores RSSI

En la Sección 2.5 se indicó un modelo que se ajusta a partir de los datos de medición, en esta sección se presenta un ajuste logarítmico de los valores de RSSI tomados en las campañas de medición realizadas en cada sector de la ciudad de Cuenca. No se distinguirá en el modelo los SF y *payload* usados en la transmisión, ya que en la Sección 5.1 se mostró que existe relación entre los mismos. Sin embargo, es importante ajustar un modelo para cada zona correspondiente a los sectores de Centro Histórico, Totoracocha y Oro Verde; debido a los resultados estadísticos obtenidos en la Sección 5.1.

5.2.1. Sector Centro Histórico

Como se mencionó en la Sección 4.2.2, el sector del Centro Histórico se dividió en 8 zonas, Figura 4.9. El ajuste logarítmico a la Ecuación 2.5 se realizó para cada una de las zonas mencionadas. Además, se adicionó un punto de -132 dBm en la distancia donde ya no existía cobertura, este valor corresponde a la sensibilidad para un SF de 10 como se muestra en la Tabla 2.3.

En la Tabla 5.17 se presenta los coeficientes correspondiente al ajuste logarítmico de los valores RSSI. En la Figura 5.6 se presenta el modelo de los valores de RSSI para cada zona,

se puede observar que la zona 1 y 7 presentan el mejor caso con un comportamiento similar y una diferencia de aproximadamente 4 dB la una con la otra. Mientras que, las zonas 2, 3, 4, y 5 tienen un alta relación, con una diferencia de 15 dB con el mejor caso descrito anteriormente.

El peor caso en este sector, está formado por las zona 6 y 8, donde el punto máximo de cobertura es a los 200 metros aproximadamente, esto se debe a que por un lado la zona 6 esta constituida por tres edificios de hormigón armado y acabado de piedra de 6 pisos entre las calles Presidente Córdova y Benigno Malo, siendo un gran obstáculo para la transmisión en el resto de la zona. Por otro lado, la Catedral construida con piedra y mármol se encuentra en la zona 8, a 100 metros aproximadamente del *gateway* siendo este el mayor obstáculo para la transmisión. Es importante recalcar que en ambas zonas existe un elevado tránsito vehicular y peatonal que puede perjudicar la transmisión de los paquetes.

Zonas	a	b	θ
Zona 1	-56.9889	-8.4377	11.7365
Zona 2	-39.6633	-12.7453	12.138
Zona 3	-39.9517	-12.6617	11.9056
Zona 4	-42.7119	-12.0632	11.7172
Zona 5	-20.7257	-15.3852	11.8992
Zona 6	6.8858	-22.5537	10.4332
Zona 7	-46.3601	-9.406	11.0453
Zona 8	10.707	-24.4189	13.6986

Tabla 5.17: Coeficientes del modelo de RSSI en el Centro Histórico

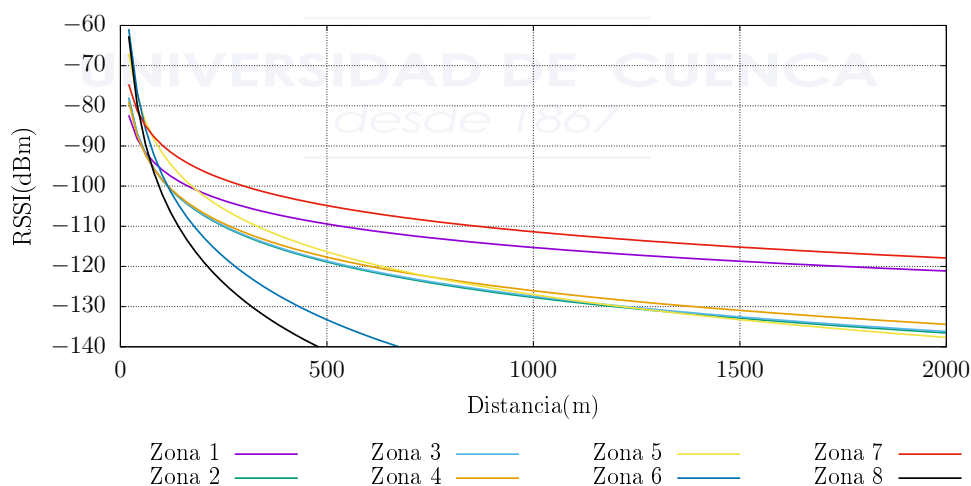


Figura 5.6: Valores de RSSI en el Centro Histórico

Para validar el modelo empírico se ha decidido descartar las zonas donde existe grandes obstáculos como la catedral y edificios de gran altura que no dan paso a la transmisión a más

de 200 metros de distancia del *gateway*. Entonces, en la Figura 5.7 se presenta el rango válido de valores de RSSI para el modelo.

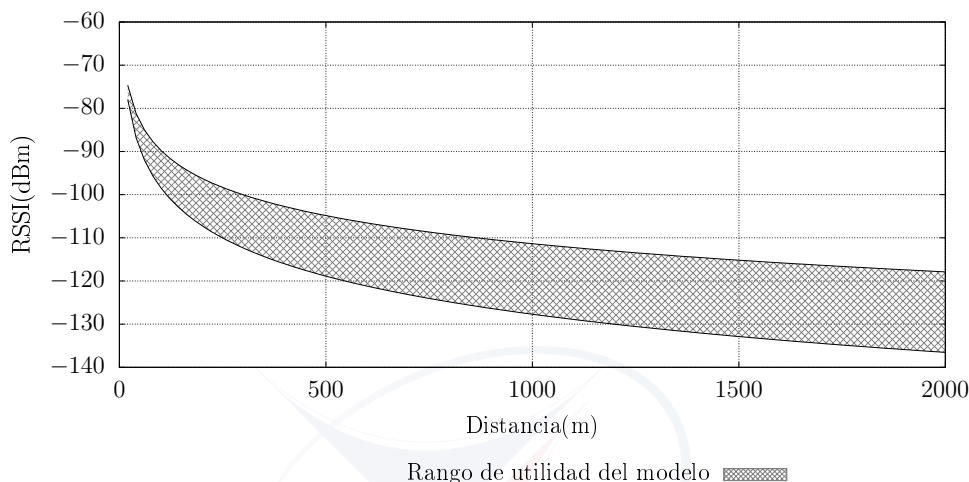


Figura 5.7: Rango útil de valores de RSSI en el Centro Histórico

5.2.2. Sector Totoracocha

En la Sección 4.2.1 se presentó al sector Totoracocha dividido en 4 zonas según la topografía del lugar. Entonces, los coeficientes resultantes del ajuste logarítmico de la Ecuación 2.5 se presenta en la Tabla 5.18. Se adiciona un punto de -132 dBm en la distancia donde se pierde totalmente la cobertura.

Zonas	a	b	θ
Zona 1	-58.7932	-6.6738	6.0182
Zona 2	-56.1214	-6.8290	6.4776
Zona 3	-47.7280	-8.8248	9.8277
Zona 4	-35.8344	-12.3643	9.2216

Tabla 5.18: Coeficientes del modelo de RSSI en Totoracocha

En la Figura 5.8 se presenta los valores de RSSI promedio para las 4 zonas. El rango de validez de los valores de RSSI para el modelo se encuentra comprendido entre la zona 2 y la zona 4 como muestra la Figura 5.9.

La zona 4 presenta una diferencia de aproximadamente 12dB con respecto al resto de zonas en el ajuste logarítmico de RSSI, esto se debe al comportamiento del terreno como se observa en la Figura 4.8.

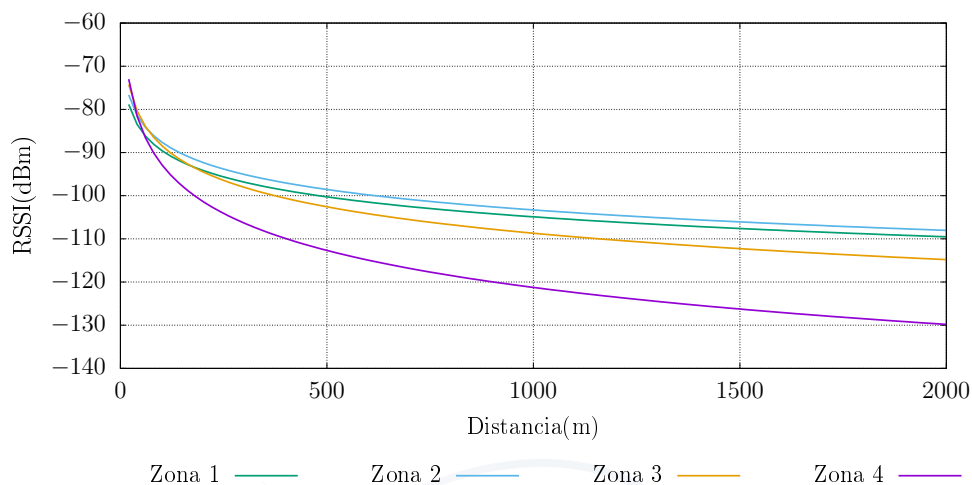


Figura 5.8: Valores de RSSI en el sector de Totoracocha

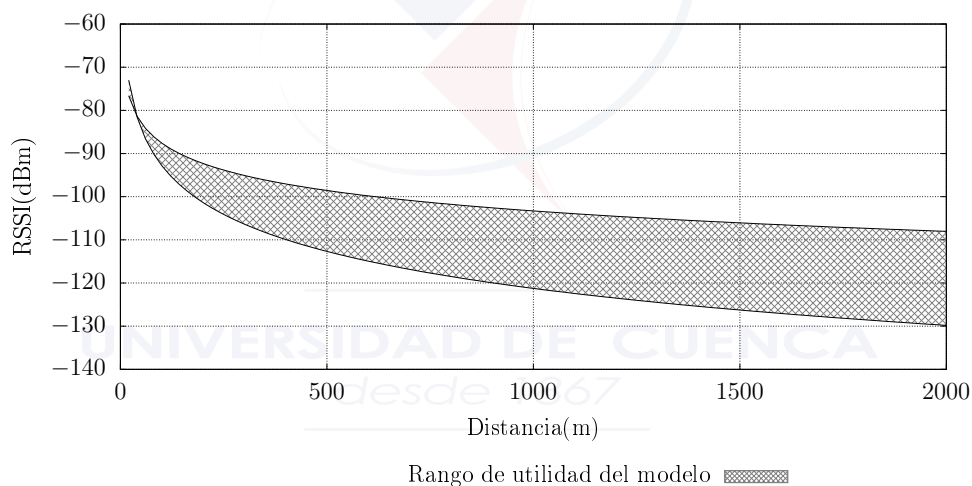


Figura 5.9: Rango útil de valores de RSSI en Totoracocha

5.2.3. Sector Oro Verde

El sector del Hotel Oro Verde fue dividido en dos zonas según su tipo de construcción, como se menciona en la Sección 4.2.3. Los coeficientes resultado del ajuste logarítmico de los valores de RSSI de acuerdo a la Ecuación 2.5, se presenta en la Tabla 5.19.

En el ajuste logarítmico de los valores de RSSI, se puede observar en la Figura 5.10 que la zona 1 y la zona 2 son similares, es importante recalcar que este sector esta formado por edificios de hormigón armado. En la Figura 5.11 se presenta el rango de utilidad de los valores de RSSI para el sector Oro Verde.

Zonas	a	b	θ
Zona 1	-23.0416	-14.7905	4.5231
Zona 2	5.6118	-18.7205	5.6856

Tabla 5.19: Coeficientes del modelo de RSSI en el sector Oro Verde

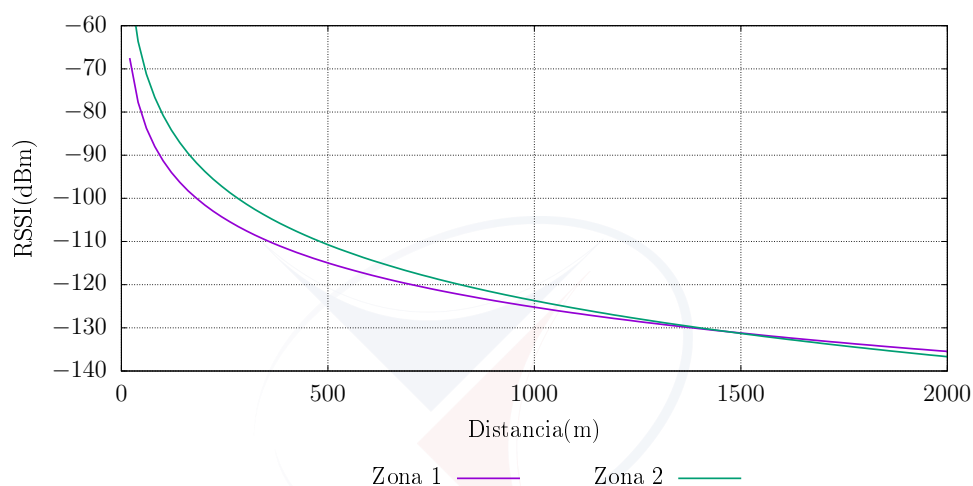


Figura 5.10: Valores de RSSI en el sector del hotel Oro Verde

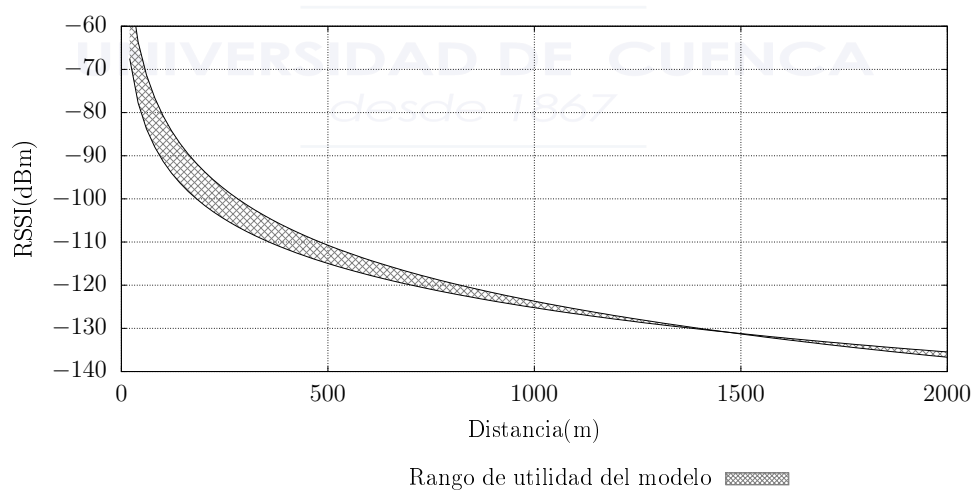


Figura 5.11: Rango útil de valores de RSSI en el sector Oro Verde

5.3. Ajuste Logarítmico General de los valores RSSI

En la Sección 5.2 se realizó el ajuste logarítmico de los valores de RSSI en las zonas correspondientes a los tres sectores: Totoracocha, Centro Histórico y Oro Verde. En esta Sección se presenta un modelo general sin dividir por zonas los diferentes sectores antes mencionados.

5.3.1. Sector Centro Histórico

Los coeficientes del ajuste logarítmico general de los valores de RSSI sin dividir por zonas como indica la Sección 4.2.2, se presenta en la Tabla 5.20. Es importante recalcar que en el Apéndice A se menciona que los valores de RSSI menores a -110 dBm no son fiables. Además, en la Figura 5.12 se muestra que el modelo logarítmico llega a los -110 dBm en la distancia de 200 metros, debido al rápido decaimiento de RSSI en las zona 6 y zona 8 presentada en la Figura 5.6.

a	b	θ
-12.4144	-18.3491	8.1335

Tabla 5.20: Coeficientes del modelo de RSSI general en el Centro Histórico

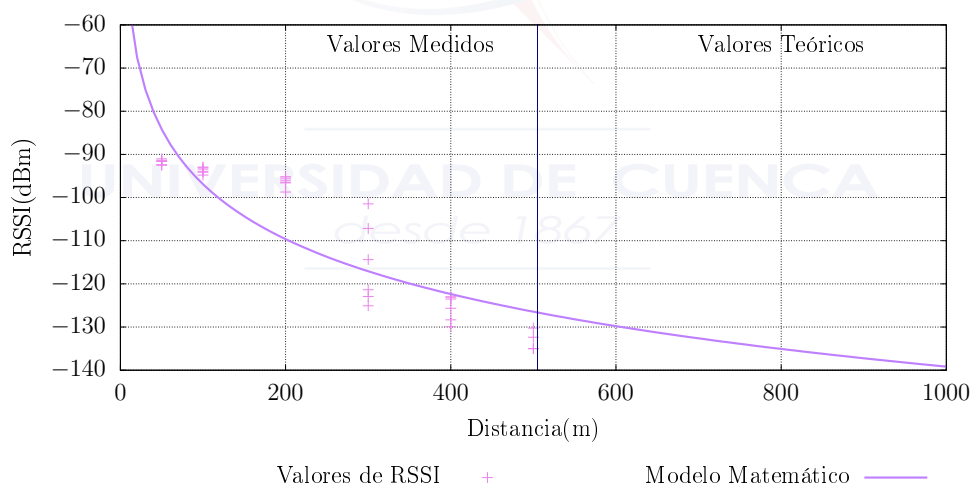


Figura 5.12: Valores de RSSI general en el Centro Histórico

5.3.2. Sector Totoracocha

En la Sección 4.2.1 se presentó al sector de Totoracocha dividido en 4 zonas según la topología del terreno. En esta sección se presenta un ajuste general de los valores de RSSI con el fin de

observar cuanto varía con el modelo correspondiente a cada zona. En la Tabla 5.21 se muestra los coeficientes resultado del ajuste logarítmico mientras que, en la Figura 5.13 se puede observar que los valores de RSSI confiables llegan hasta una distancia de aproximadamente 800 metros, esto como resultado del promedio general.

a	b	θ
-42.8674	-9.9681	5.7791

Tabla 5.21: Coeficientes del modelo de RSSI general en Totoracocha

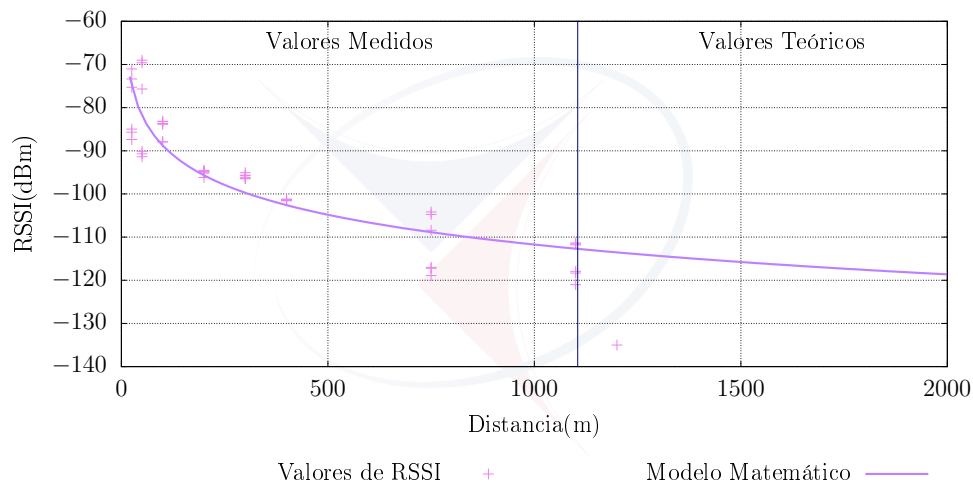


Figura 5.13: Valores de RSSI general en el sector Totoracocha

5.3.3. Sector Oro Verde

En la Sección 4.2.3 se presenta el sector del Hotel Oro Verde dividido en dos zonas según el tipo de construcción y la topología del lugar. En esta sección se presenta el modelo general del ajuste logarítmico de los valores de RSSI, los coeficientes del modelo matemático se muestran en la Tabla 5.22.

a	b	θ
-17.1086	-15.4364	5.5172

Tabla 5.22: Coeficientes del modelo de RSSI general en el sector Oro Verde

El ajuste logarítmico general del sector Oro Verde mostrado en la Figura 5.14 indica que los valores de RSSI confiables según el Apéndice A se encuentran hasta los 420 metros apro-

ximadamente. Este modelo no tiene mayor diferencia a los modelos correspondientes a las dos zonas mencionadas en la Sección 4.2.3.

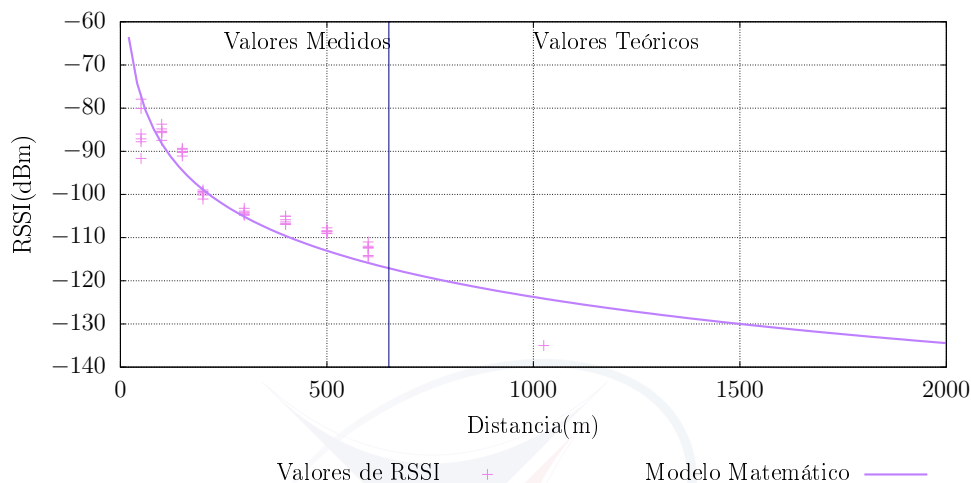


Figura 5.14: Valores de RSSI general en el sector Oro Verde

5.4. Modelo de pérdidas de trayectoria

En la Sección 2.5 se presentó la Ecuación logarítmica 2.5 para el ajuste logarítmico del modelo de pérdidas de trayectoria, cuyos parámetros fijos se presentan en la Tabla 5.23. En esta sección se ajusta un modelo para cada zona de los tres sectores seleccionado en la ciudad de Cuenca expuestos en la sección 4.2.

Constantes	Valor
T_p	18.43 dBm
G_t	0.2 dB
G_r	0.2 dB

Tabla 5.23: Parámetros fijos para el modelo de pérdidas de trayectoria.

5.4.1. Sector Centro Histórico

En la Figura 5.15 se observa el ajuste logarítmico al modelo de pérdida de trayectoria para cada una de las zonas descritas en la Sección 4.2.2 del Centro Histórico, mientras que en la Tabla 5.24 se presenta los coeficientes del modelo matemático para las mismas.

Existen las mismas diferencias en el ajuste del modelo de pérdida de trayectoria y el ajuste de los valores de RSSI para todas las zonas obtenidas en la Sección 5.2.1. En la Figura 5.16 se

presenta el rango de utilidad del ajuste logarítmico al modelo de pérdidas de trayectoria.

Zonas	a	b	θ
Zona 1	75.8189	8.4377	11.7365
Zona 2	61.1838	11.5176	22.6229
Zona 3	58.7817	12.6617	11.9056
Zona 4	61.5419	12.0632	11.7172
Zona 5	39.5557	15.3852	11.8992
Zona 6	11.9442	22.5537	10.4332
Zona 7	65.1901	9.406	11.0453
Zona 8	8.123	24.4189	13.6986

Tabla 5.24: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en el Centro Histórico

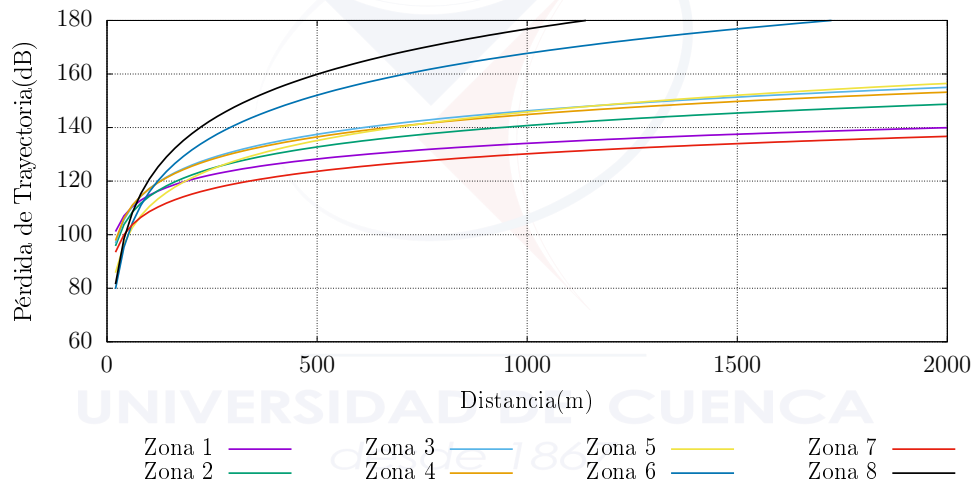


Figura 5.15: Modelo de Pérdidas de trayectoria en el Centro Histórico

5.4.2. Sector Totoracocha

En la Figura 5.17 se presenta el modelo al ajuste logarítmico del modelo de pérdidas de trayectoria, mientras que en la Tabla 5.25 se presentan las constantes del modelo matemático. En la Sección 5.2.2 se mostró el ajuste logarítmico de los valores de RSSI para las 4 zonas del sector de Totoracocha, el modelo matemático de pérdida de trayectoria está en función del RSSI y los parámetros fijos mostrados en la Tabla 5.23, por lo que ambos ajustes tienen las mismas diferencias. El rango del modelo de pérdida de trayectoria se presenta en la Figura 5.18.

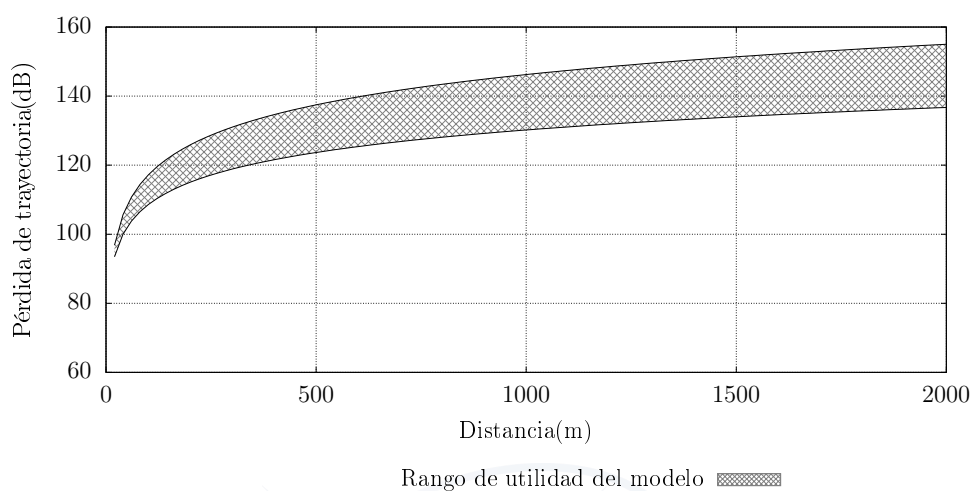


Figura 5.16: Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en el Centro Histórico

Zonas	a	b	θ
Zona 1	77.6232	6.6738	6.0182
Zona 2	74.9514	6.829	6.4776
Zona 3	66.5580	8.8248	9.8277
Zona 4	54.6644	12.3643	9.2216

Tabla 5.25: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en Totoracocha

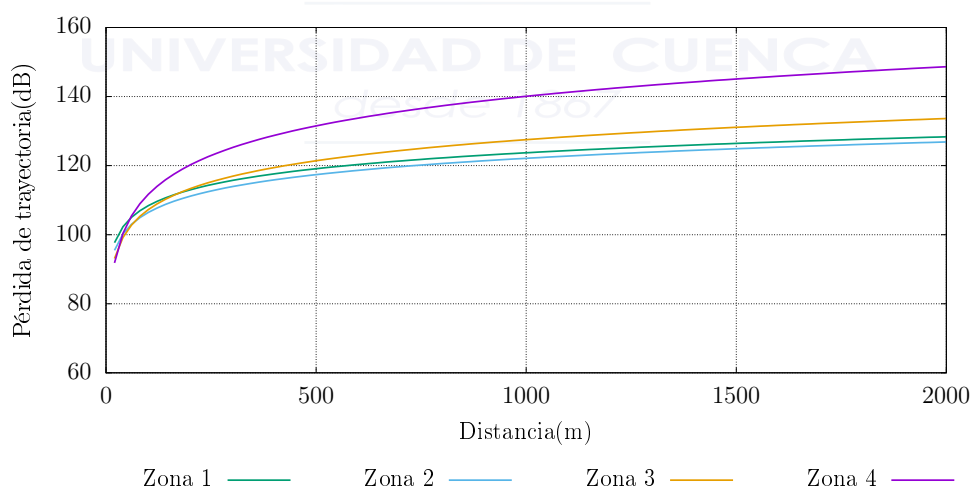


Figura 5.17: Modelo de Pérdidas de trayectoria en Totoracocha

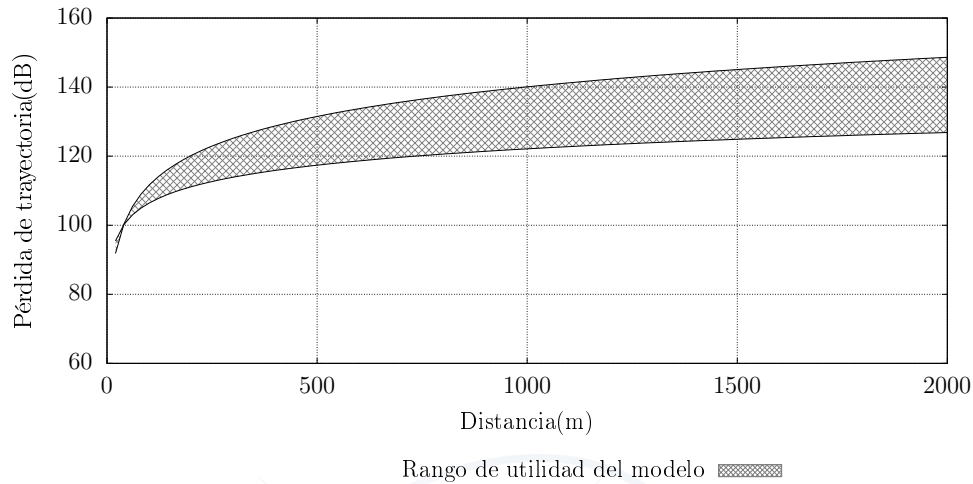


Figura 5.18: Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en Totoracocha

5.4.3. Sector Oro Verde

En la Figura 5.19 se presenta los modelos correspondiente al ajuste logarítmico de pérdidas de trayectoria, en la Tabla 5.26 los coeficientes de los modelos matemáticos correspondientes a cada zona del sector Oro Verde descritas en la Sección 4.2.3.

Además, es importante recalcar que el modelo de pérdidas de trayectoria está en función de los valores de RSSI, por lo que las diferencias encontradas en el ajuste logarítmico de RSSI en la Sección 5.3.3 son similares al ajuste del modelo de pérdidas de trayectoria de esta sección. En la Figura 5.20 se presenta el rango útil para el modelo de este sector.

Zonas	a	b	θ
Zona 1	41.8716	14.7905	4.5231
Zona 2	13.2182	18.7205	5.6856

Tabla 5.26: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria en el sector Oro Verde

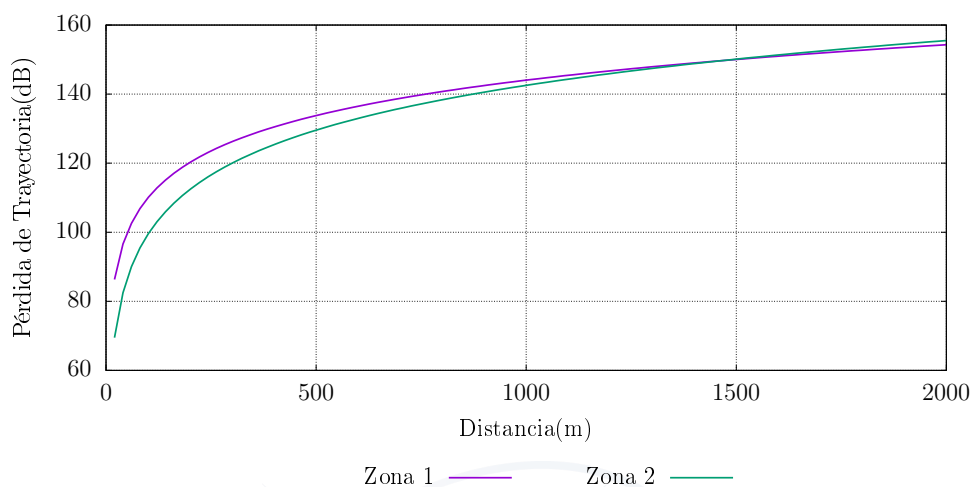


Figura 5.19: Modelo de Pérdidas de trayectoria en el sector Oro Verde

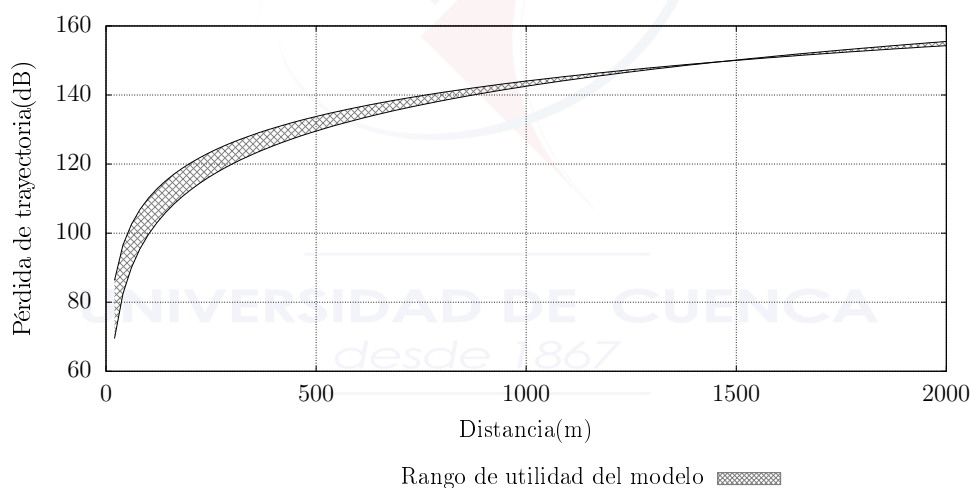


Figura 5.20: Rango útil del modelo de pérdida de trayectoria en el sector Oro Verde

5.5. Modelo de pérdida de trayectoria general

En la Sección 5.4 se realizó el ajuste logarítmico del modelo de pérdida de trayectoria para los tres sectores seleccionados en la ciudad de Cuenca, los cuales fueron divididos en zonas según su topología o arquitectura. En esta sección se presenta un ajuste general del modelo de pérdida de trayectoria sin dividir por zonas los diferentes sectores.

5.5.1. Sector Centro Histórico

En la Sección 5.4.1 se presentó el ajuste logarítmico del modelo de pérdidas de trayectoria para cada zona del Centro Histórico, en esta sección se muestra un modelo general del mismo, Figura 5.21. Los coeficientes del modelo matemático se puede ver en la Tabla 5.27.

El modelo de pérdida de trayectoria general se encuentra ubicado aproximadamente al centro de cada uno de los modelos de las 8 zonas como resultado del promedio de las mismas.

a	b	θ
31.2444	18.3491	8.1335

Tabla 5.27: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en el Centro Histórico.

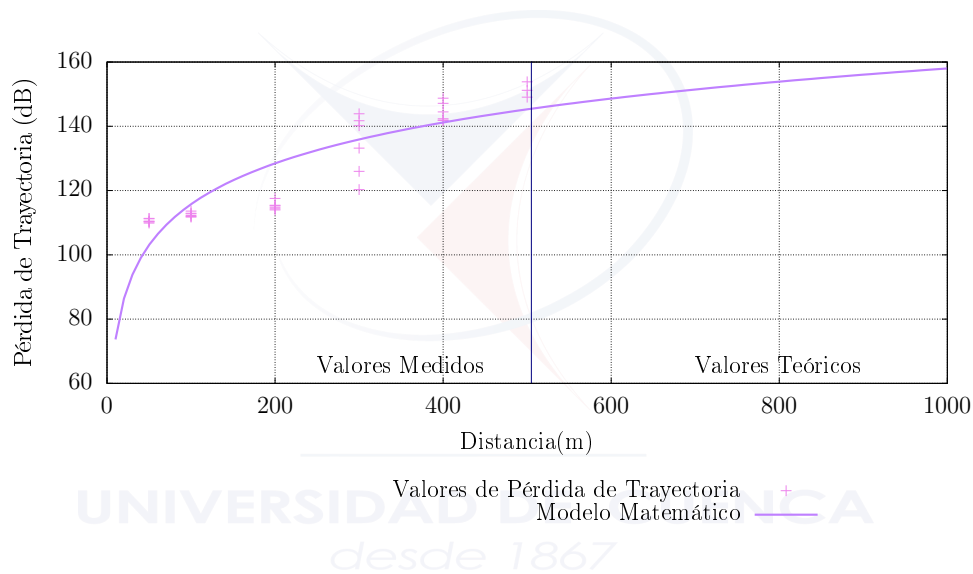


Figura 5.21: Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el Centro Histórico

5.5.2. Sector Totoracocha

En la Sección 5.4.2 se presentó un modelo de pérdidas para cada zona del sector de Totoracocha, en esta sección se muestra un modelo general como indica la Figura 5.22 cuyos coeficientes matemáticos del modelo se encuentran en la Tabla 5.28.

El modelo general de pérdidas de trayectoria se encuentra ubicado en la parte central del rango útil del modelo de pérdidas de trayectoria presentado en la Figura 5.18.

5.5.3. Sector Oro Verde

En la Sección 5.4.3 se presenta un modelo de pérdidas de trayectoria para cada zona del sector Oro Verde, en esta sección se muestra un modelo general como indica la Figura 5.23 con

a	b	θ
61.6974	9.9681	5.7791

Tabla 5.28: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en Totoracocha.

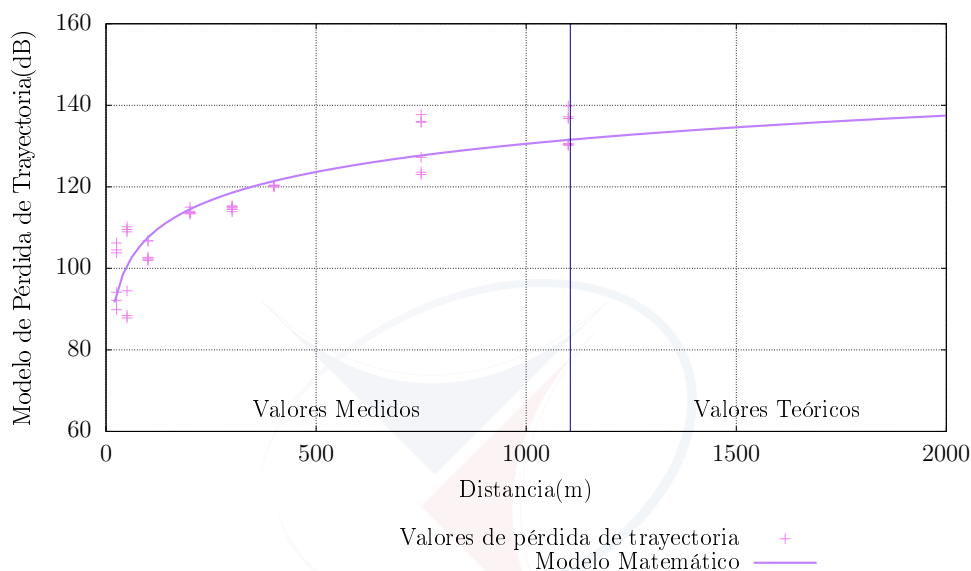


Figura 5.22: Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el sector del Totoracocha

sus correspondientes coeficientes matemáticos, Tabla 5.29.

El modelo general de pérdidas de trayectoria para este sector, se encuentra ubicado en la parte central del rango útil presentado en la Figura 5.20.

a	b	θ
35.9386	15.4364	5.5172

Tabla 5.29: Coeficientes del modelo de pérdida de trayectoria general en el sector Oro Verde.

5.5.4. Comparación de los modelos propuestos.

Se realizó el ajuste logarítmico del modelo de pérdidas de trayectoria para cada zona correspondiente a los tres sectores en la Sección 5.4. Posteriormente, se realizó el modelamiento general para cada sector, en la Figura 5.24 se presenta los tres modelos logarítmicos con el fin de observar cuanto varía cada modelo. Se puede observar que el modelo del Centro Histórico tiene mayores pérdidas; mientras que, el sector Totoracocha posee el mejor caso con respecto a los otros dos sectores. Esto se debe a las características propias de cada lugar; ya sea por su

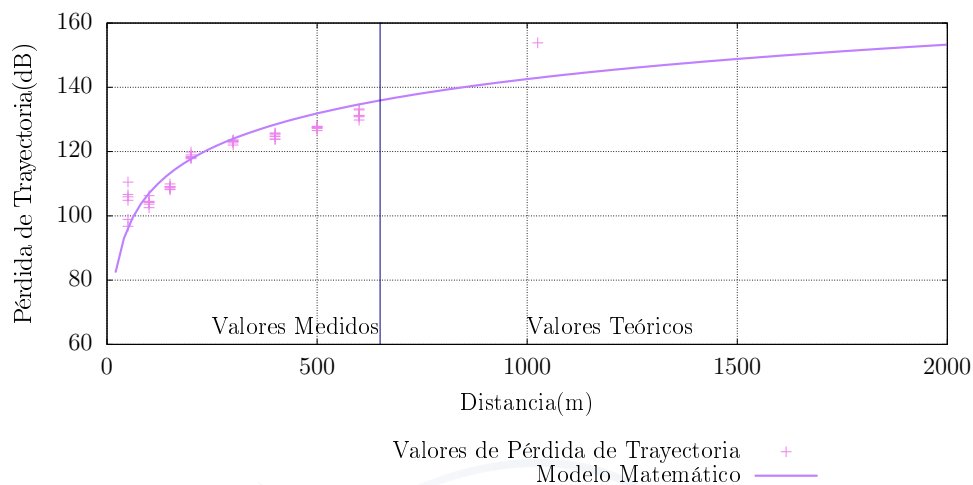


Figura 5.23: Modelo de Pérdidas de trayectoria general en el sector del Oro Verde

arquitectura o topografía. Aunque, el sector del Oro Verde posee edificios de una altura similar que el Centro Histórico, estos no se encuentran ubicados continuamente, por lo que existe una diferencia de 20 dB entre estos dos sectores.

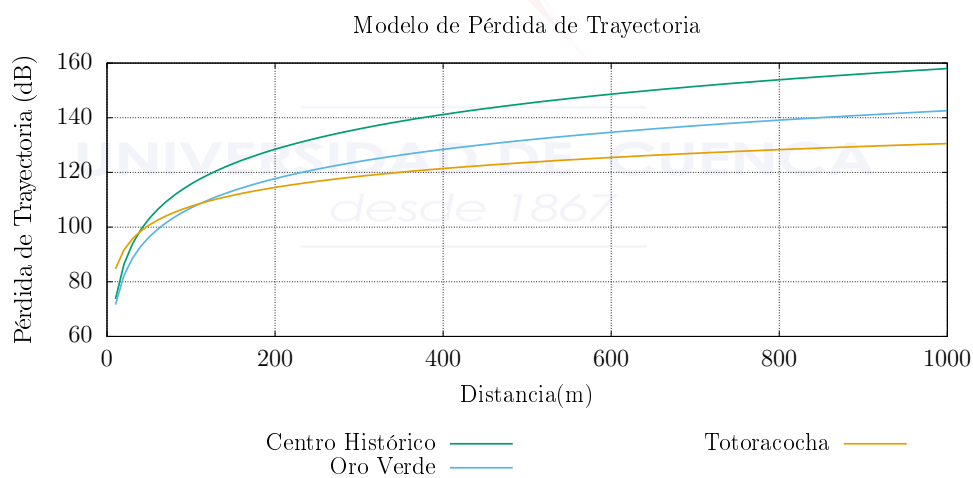


Figura 5.24: Modelo de Pérdidas de trayectoria de los tres sectores.

5.5.5. Comparación de los modelos propuestos con LoRaSim

El modelo propuesto por LoRaSim se basa en la Ecuación 5.1 [38].

$$P_L = P_0 + 10 * \gamma * \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\theta \quad (5.1)$$

Donde:

P_0 : Potencia recibida en la distancia de referencia dBm.

d_0 : Distancia de referencia.

d : Distancia del nodo con respecto al *gateway*.

γ : Coeficiente propio de cada ambiente.

En la Figura 5.25, se presenta el modelo general del sector Oro Verde propuesto en la Sección 5.5.3 y el modelo de LoRaSim que usa por defecto. Para obtener el modelo de LoRaSim, se procedió a realizar simulaciones de transmisión cada 50 metros; de esta manera se obtuvo los valores de RSSI y las constantes P_0 , d_0 y γ .

Sin embargo, se puede observar que existe una gran diferencia entre los dos modelos, por lo que es necesario encontrar constantes propias para cada ambiente en el modelo propuesto por LoRaSim. Al ser la ecuación de LoRaSim logarítmica, es posible encontrar los valores P_0 , d_0 y γ a partir de los modelos propuestos para cada ambiente, estos valores se presentan en la Tabla 5.30.

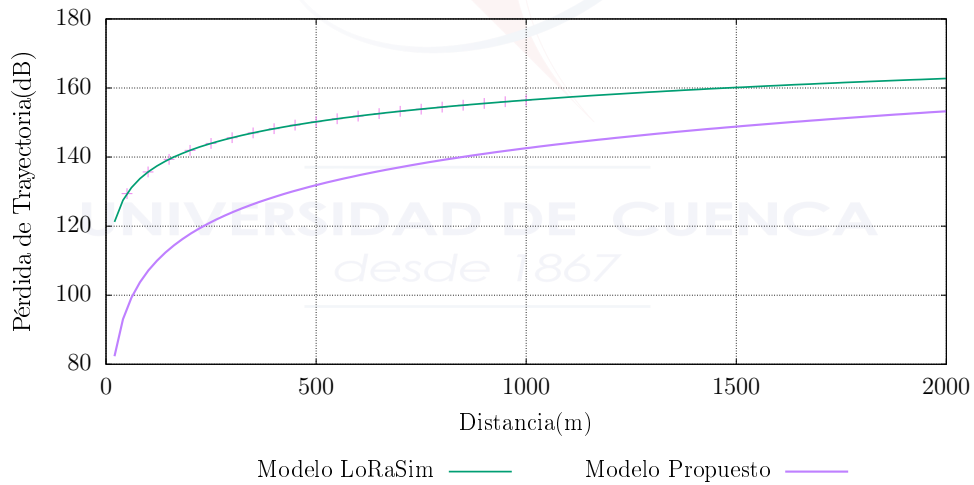


Figura 5.25: Modelos de Pérdidas de trayectoria del sector Oro Verde y LoRaSim

Sector	P_0	γ	θ
Centro Histórico	96.7011	2.8249	8.1491
Totoracocha	98.9321	4.225	8.1335
Oro Verde	92.8816	3.5544	5.5172

Tabla 5.30: Modelo de Pérdidas de Trayectoria

5.6. Conclusiones

En el análisis estadístico, se determinó que las diferentes configuraciones de transmisión no tienen diferencias significativas con respecto al rango máximo de transmisión, por lo que no es necesario ajustar un modelo de propagación en función de *payload* y *SF*.

El sector de Totoracocha está caracterizado por tener una variación significativa en su perfil de elevación, por lo que dicho sector fue dividido por zonas según su topografía. Se notó que los resultados obtenidos en una ubicación determinada depende de la diferencia de elevación entre el transmisor y receptor, además de los obstáculos presentes en la trayectoria de la señal.

Por otro lado, el Centro Histórico fue dividido por zonas, las cuales tienen un perfil de elevación similar. Sin embargo, en dos de las zonas de dicho sector se presentan construcciones de gran tamaño lo cual hace que los resultados de las campañas de medición no sirvan para el estudio del ambiente seleccionado.

Se pretendía estudiar el comportamiento de *LoRa* en construcciones de gran altura, no se encontró una zona con edificios ubicados de manera continua dentro de la ciudad. El sector del Hotel Oro Verde se dividió en dos zonas, la primera con mayor número de edificios de gran altura y la segunda con viviendas residenciales y edificios comerciales sin mayor elevación; sin embargo, los resultados obtenidos fueron similares.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo se expone las conclusiones del trabajo de investigación realizado, las dificultades y limitaciones durante el desarrollo, y además, propuestas de estudio futuros.

6.1. Conclusiones

Como trabajo previo, en el Apéndice A se demostró que el equipo LoRa entrega valores fiables de RSSI hasta los -110dBm. Además, se comprobó que no existe diferencias entre el uso de la antena omnidireccional y direccional, ya que la frecuencia de resonancia de las antenas se encuentra alejada de la frecuencia de transmisión del módulo LoRa.

Se eligieron sectores representativos de la ciudad de Cuenca para realizar las diferentes campañas de medición; el sector urbano del Centro Histórico está caracterizado por múltiples edificios coloniales de gran altura por lo que, los valores de RSSI confiables llegaron hasta un radio de aproximadamente 200 metros, existe un elevado tránsito peatonal y vehicular en esta zona pero no se realizó un estudio específico del impacto de esto durante las transmisiones. Mientras que, en el sector de Totoracocha formado por viviendas residenciales de poca altura se obtuvieron valores confiables de RSSI hasta aproximadamente 500 metros de radio, existieron puntos específicos de este sector con una distancia mayor a los 500 metros pero con una diferencia de altura importante respecto al *gateway* donde se obtuvieron transmisiones satisfactorias. La distancia confiable máxima en el sector Oro verde es de aproximadamente 500 metros, aunque este sector está formado por edificios de gran altura, estos no están ubicados continuamente.

Los resultados de las campañas de medición en varios escenarios bajo diversas condiciones, revelan diferencias significativas; por lo que se puede concluir que el desempeño de LoRaWAN depende de varios factores como: diferencia de elevación, tipo de obstáculos en la ruta de la señal y distancia entre el *gateway* y nodo.

Por otro lado, se pretendía ajustar un modelo que tomara en cuenta el *payload* y *SF*, pero las pruebas de análisis estadístico demostraron una alta relación en los valores de *RSSI* y *SNR* para los diferentes tipos de configuración de transmisión.

6.2. Recomendaciones

Durante el desarrollo del proyecto de investigación, se encontraron algunas variables que pueden influir en el comportamiento de *LoRa*, por lo que se tiene las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar pruebas con equipos más sensibles, que arrojen valores de *RSSI* confiables para ajustar un modelo de pérdidas más exacto.
- Durante las pruebas de transmisión se pudo observar que la altura del *gateway* influye en el alcance de la señal, sin embargo, existieron puntos cercanos al mismo sin cobertura, esto se debe a la arquitectura y topografía de la zona. Se recomienda hacer un estudio de como afecta los diferentes tipos de obstáculos ya sea el material de construcción del sector o la densidad peatonal y vehicular en la trayectoria de la señal.
- En el presente proyecto se usó una sola altura en el transmisor, correspondiente a la de un medidor. Se recomienda usar diferentes alturas, con el fin de abarcar más aplicaciones con una misma red *LoRa*, o un transmisor con movimiento para aplicaciones vehiculares.
- Es importante estudiar el comportamiento de *LoRa* en sectores con edificios de gran altura, debido a que no se encontró una zona con edificios ubicados de manera continua.

6.3. Trabajos Futuros

Es importante ampliar y mejorar el presente proyecto de investigación:

- Como se mencionó anteriormente, en las campañas de medición se transmitió a una sola altura correspondiente a la de un medidor de luz. Como trabajo futuro sería verificar el comportamiento de la red *LoRa* al variar la altura en el transmisor para diferentes aplicaciones de *IoT*.
- En la sección de conclusiones se mencionó el trabajo previo realizado, donde se comprobó que las antenas direccional del paquete *LoRa* 900 y la antena direccional HG908p-SM no tenían mayor diferencias al usarlas, esto se debe a que la frecuencia de resonancia de las antenas se encuentra alejada de la frecuencia de transmisión del módulo *LoRa*. Sería



importante la construcción de antenas diseñadas propiamente para equipos [LoRa](#).

- Este trabajo se basó en la capa de red: [LoRaWAN](#), sin embargo, existen otros enfoques como: LoraBlink que permite multisalto y LoRa FABIAN que adapta los protocolos de Internet para facilitar su uso, por lo que sería importante investigar lo antes mencionado para verificar su utilidad.
- Sería adecuado estudiar el comportamiento de una red [LoRa](#) en ambientes donde exista edificios de gran altura ubicados de forma continua, debido que en el presente trabajo de investigación no se encontró en la ciudad un sector con dichas características.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Anexos

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Apéndice A

Reporte Técnico

El siguiente trabajo es un estudio previo al proyecto de investigación, que pretende verificar la fiabilidad de los valores de [RSSI](#) entregados por los equipos de transmisión del kit LoRa 900. En este trabajo también se comprueban varios parámetros técnicos de los equipos, así como las diferencias al usar dos tipos de antenas.

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones

PRUEBAS DE LABORATORIO DEL KIT DE DESARROLLO LORA 900

Juan Peralta(JP), Liseth Carrion(LC), Carlos Alvarez(CA)

10 de septiembre de 2017

Universidad de Cuenca

Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET)

Reporte Técnico Núm. DEET-PWSN-2017-09

Índice

1. Introducción	1
2. Materiales y Equipos	1
2.1. Atenuador de paso manual	1
2.2. Dispositivo PXI	4
2.3. Sensor de potencia USB-5681	4
3. Caracterización de equipos	5
3.1. Atenuación de conductores	5
3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa	7
3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa	7
3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos	7
3.5. Verificación de parámetros de antenas	7
4. Metodología	10
4.1. Pruebas en Laboratorio	10
4.2. Pruebas en Campo	11
5. Resultados	13
5.1. Pruebas de Laboratorio	13
5.2. Pruebas de Campo	14
6. Conclusiones y Recomendaciones	22
A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa	24
A.1. Instalación de librería para el descifrado	24
A.2. Código para el descifrado	24
A.3. Código del Servidor	25
B. Anexo II: Código del Transmisor	27

Índice de figuras

1.	Atenuación del cable de 0.5m	5
2.	Atenuación del cable de 0.75m	6
3.	Atenuación del cable de 1m	6
4.	Espectro de transmisión del modulo LoRa	8
5.	Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.	8
6.	Impedancia antena omnidireccional	9
7.	Impedancia antena direccional	9
8.	Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio .	10
9.	Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros	12
10.	Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros	12
11.	Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación	13
12.	Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación	14
13.	Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación	14
14.	Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado	15
15.	Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado	16
16.	Ambiente 1: PER vs Campo Esperado	16
17.	Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	17
18.	Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado	18
19.	Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado	18
20.	Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado	19
21.	Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	19
22.	Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado	20
23.	Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado	20
24.	Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado	21
25.	Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	21

Índice de tablas

1.	Descripción de atenuador variable.	3
2.	Precisión en función de la atenuación.	3
3.	Descripción de medidor de potencia USB-5681.	4
4.	Potencia de transmisión del módulo LoRa	7



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

1. Introducción

El trabajo expuesto en este documento, fue realizado con el fin de verificar la fiabilidad de los valores de RSSI y SNR entregados por los equipos de transmisión del kit de desarrollo LoRa 900, el cual se compone de un *gateway* y dos nodos que cuentan con el módulo RN2903 producido por Semtech¹. Este trabajo forma parte del proyecto *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba*.

Durante el desarrollo del trabajo, se comprobó varios parámetros técnicos de los equipos a utilizar tales como: atenuación de conductores, potencia y modo de transmisión del módulo LoRa. También se verificó los parámetros de las antenas direccional y omnidireccional.

Se realizó campañas de mediciones dentro de laboratorio y en ambientes exteriores controlados, utilizando atenuadores de potencia fijos y variables para determinar el comportamiento del indicador de nivel de señal recibida medida por el equipo (RSSI) por sus siglas en inglés. Los valores de RSSI obtenidos tanto en las pruebas de laboratorio y en ambientes controlados mostraron una correlación con el nivel de potencia esperado hasta un valor mínimo de -110dBm, los valores de atenuación menores a este no revelaron relación con la medida de RSSI del equipo. Mientras que, la cantidad de paquetes perdidos en cada transmisión se mantuvo constante alrededor del 5 % hasta un valor mínimo el cual variaba dependiendo del factor de ensanchamiento utilizado.

Las transmisiones se realizaron con diferentes valores de carga útil y factor de ensanchamiento, pero los resultados no revelaron una diferencia considerable de estos factores en la medida de RSSI y SNR. Sin embargo, la tasa de pérdida de paquetes si se vio afectada, por lo que es importante aumentar la cantidad de paquetes enviados en valores de nivel de potencia menores a -110dBm.

2. Materiales y Equipos

2.1. Atenuador de paso manual

Los atenuadores de Radio Frecuencia (RF) son dispositivos que se utilizan para reducir la potencia de una señal sin distorsionar su forma original; es decir, son resistencias eléctricas que se alinean con una señal de RF y reducen la intensidad de la señal al convertir cierta cantidad de energía de RF en calor. El nivel de atenuación está definido por el valor de resistencia utilizada. Las señales de RF son irradiadas entre equipo transmisor y receptor; cuando dos conexiones de este sistema se encuentran ubicados demasiado cerca, entonces pueden actuar como un corto dependiendo de la frecuencia

¹Semtech - <https://www.semtech.com/>

de la señal de RF, las resistencias de hilo bobinado no tienen un comportamiento de atenuador sino que actúan como inductores.

2.1.1. Atenuadores Fijos

Estos dispositivos normalmente están integrados por resistencias de carbono, cuyo valor está determinado por el nivel de atenuación necesario. Si la aplicación requiere tener una atenuación muy precisa, entonces es necesario una resistencia de precisión y atenuadores calibrados, estos requerimientos se traducen en un mayor costo del atenuador.

2.1.2. Atenuadores conmutados

Los atenuadores conmutados comprenden dos partes: conmutadores de RF y resistencias fijas. Estos dispositivos permiten obtener varios niveles de atenuación, esto se consigue conmutando entre diferentes resistencias. Según el nivel de precisión y la frecuencia requerida son necesarios diferentes tipos de conmutador, teniendo desde elementos mecánicos hasta digitales, pero también se pueden usar relés de RF y otros métodos de conmutación.

2.1.3. Atenuadores variables

Los atenuadores variables pueden ser digitales o analógicos, cuya principal característica es permitir el ajuste del nivel de atenuación en función de una resistencia variable. Dispositivos de mayor precisión están conformados por elementos integrados que permiten ajustarse a diferentes valores de frecuencia y potencia.

2.1.4. Aplicaciones

Las aplicaciones más comunes de los atenuadores de RF son en procedimientos de pruebas y mediciones, en donde el nivel de la señal necesita ser controlado; ya que puede estar por encima de lo recomendado para el buen funcionamiento del equipo de prueba.

Un atenuador se puede utilizar para proporcionar una adaptación de impedancia precisa, ya que la mayoría de atenuadores fijos ofrecen una impedancia bien definida.

2.1.5. Atenuadores de RF de paso manual 8494B y 8496B

La atenuación puede ser variada mediante una perilla de control ubicada en la parte lateral del equipo, esta atenuación es añadida en la ruta de la señal sobre la pérdida de inserción del atenuador en la posición de 0dB. Estos atenuadores de paso

coaxiales son de 50 ohmios. La atenuación total que proporciona el dispositivo está determinada por la atenuación que se configure de manera individual en cada elemento 8494B y 8496B, los cuales están conectados en cascada. Los conectores de ambas secciones son de Tipo N hembra.

Dispositivo	8494B	8496B
Rango de Frecuencia	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
Atenuación	0 dB a 11 dB	0 dB a 110 dB
Paso	1 dB	10 dB

Tabla 1: Descripción de atenuador variable.

En la Tabla 2 se muestra la precisión que presenta el equipo ante diferentes valores de atenuación requerido.

8494B	8496B	8494B	8496B
Atenuación dB	Atenuación dB	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
1	10	0.3	0.5
2	20	0.3	0.7
3	30	0.4	0.9
4	40	0.4	1.2
5	50	0.5	1.5
6	60	0.5	1.8
7	70	0.6	2.1
8	80	0.6	2.4
9	90	0.6	2.7
10	100	0.6	3.0
11	110	0.7	3.3

Tabla 2: Precisión en función de la atenuación.

2.1.6. Recomendación

No es aconsejable utilizar el equipo para medir señales que excedan 1W de potencia. Además, no se debe aplicar una tensión mayor a 7 Vcd en la entrada o salida del atenuador.

2.2. Dispositivo PXI

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) es una plataforma de instrumentación modular, diseñada para aplicaciones de alto rendimiento y bajo costo de implementación; con características mecánicas, eléctricas y de software que definen sistemas completos para aplicaciones de pruebas militares, aeroespaciales, monitoreo de máquinas, automotrices y pruebas industriales. Proporciona energía, enfriamiento y un bus de comunicación para soportar múltiples módulos de instrumentación dentro de un mismo chasis. National Instruments desarrolló y anunció la especificación PXI en 1997 y la publicó en 1998, PXI es un estándar abierto en la industria gobernado por PXI Systems Alliance (PXISA).

2.3. Sensor de potencia USB-5681

El dispositivo utilizado para medir la potencia de la señal de RF radiada por el transmisor es un USB-5681 de National Instruments, el cual permite determinar el valor de potencia RMS; este elemento cuenta con conectividad USB que permite alimentarlo desde el computador. El dispositivo consume 150 mA de la conexión USB, lo que lo convierte en ideal para aplicaciones móviles, resulta muy conveniente cuando se requiere obtener medidas promedio con un gran nivel de precisión.

La activación del hardware del USB-5681, puede ser por una fuente de activación externa o por su propio software, la elección se da en función de la fuente de señal. Para visualizar el valor medido se hace uso del propio software NI-568x Soft Front Panel en el cual se muestra de manera numérica y gráfica.

Parámetros generales	
Tipo de equipo	Medidor de potencia portátil
Medición de Potencia	Potencia media
Canales	Canal único
Frecuencia	10 MHz a 18 GHz
Rango de potencia	-40 a 20 dBm
Impedancia	100 k Ω
Resolución de medición	0.01 dB
Rango de retardo	-5 ms a 10 s

Tabla 3: Descripción de medidor de potencia USB-5681.

3. Caracterización de equipos

3.1. Atenuación de conductores

El proceso de caracterización de los atenuadores se realizó en el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2.

El valor de atenuación de los conductores fue determinado mediante una transmisión con -10dBm de potencia, la diferencia de potencia medida por el modulo receptor se considera como la atenuación producida por los conductores.

Las gráficas de potencia obtenidas para diferentes longitudes de cable se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

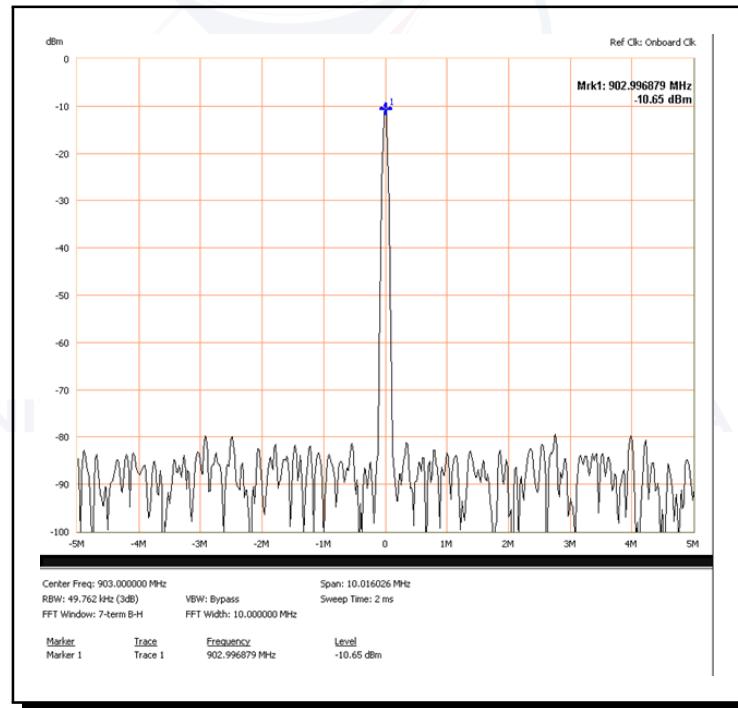


Figura 1: Atenuación del cable de 0.5m

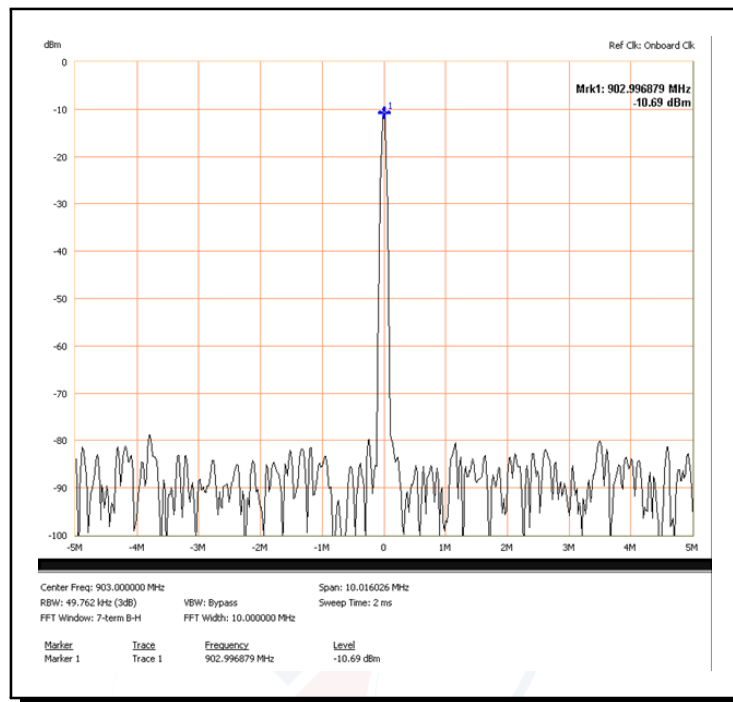


Figura 2: Atenuación del cable de 0.75m

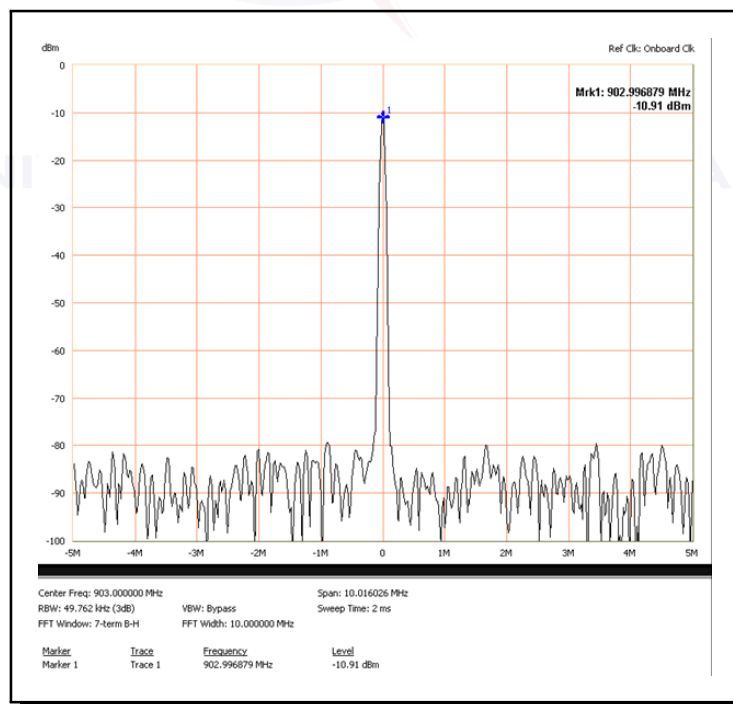


Figura 3: Atenuación del cable de 1m

3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa

Las pruebas para determinar la potencia de transmisión del módulo LoRa fueron realizadas con las diferentes configuraciones de potencia (pwridx) expuestas en [1].

El dispositivo de medición de potencia utilizado fue el mostrado en la Sección 2.3, los resultados de las pruebas y su comparación con lo especificado por el fabricante se muestra en la Tabla 4.

Configuración (pwridx)	Potencia Medida (db)	Potencia Fabricante (db)
5	18.43	18.5
7	15.74	15
8	13.91	14
9	12.05	13
10	10.14	10

Tabla 4: Potencia de transmisión del módulo LoRa

3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa

Se utilizó el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2 en modo de captura de máximos para obtener el espectro completo de la transmisión, al ser el dispositivo utilizado de Clase A[2], la transmisión se realiza de manera no continua, un paquete a la vez. Como se puede observar en la Figura 4, se utilizan 7 portadoras que se encuentran alrededor de los 903Mhz.

3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos

Para las pruebas de laboratorio y de campo se debe enviar cierta cantidad de paquetes, la finalidad de esta prueba es verificar la fiabilidad del valor de pérdida de paquetes con respecto a la cantidad de paquetes transmitidos. En la Figura 5 se puede observar varias transmisiones con diferente número de paquetes en el cual se ha variado el nivel de atenuación, los resultados obtenidos muestran que en las transmisiones entre 300 y 1000 paquetes la cantidad de paquetes perdidos es un valor estable.

3.5. Verificación de parámetros de antenas

Se realizó una prueba de impedancia a cada antena que se usarán en el campo para la verificación de la frecuencia de resonancia de las mismas.

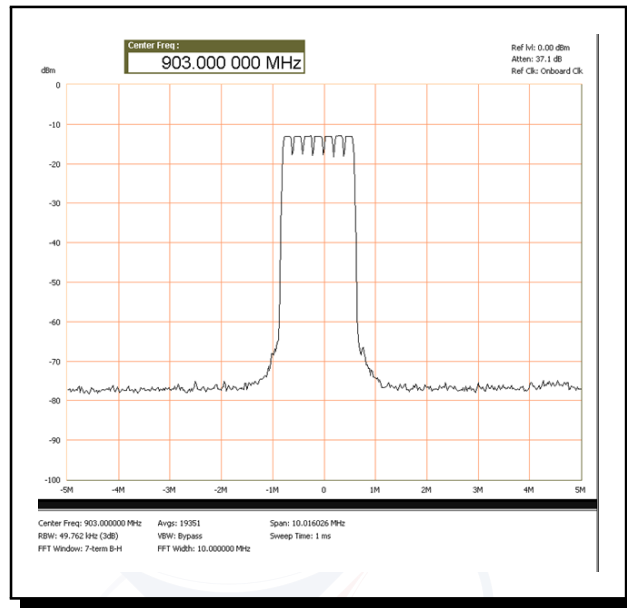


Figura 4: Espectro de transmisión del módulo LoRa

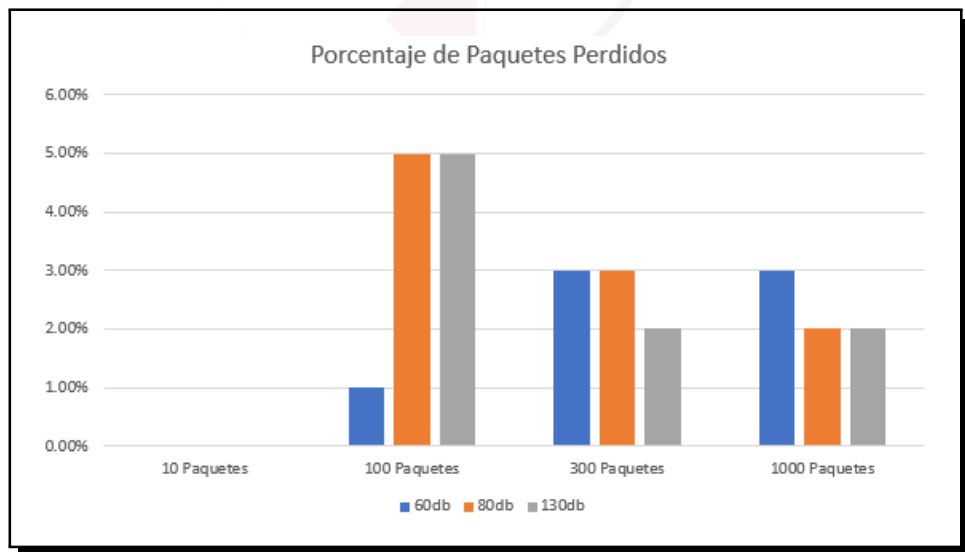


Figura 5: Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.

El gráfico obtenido para la antena omnidireccional incluida en el kit de desarrollo LoRa 900 se muestra en la Figura 6.

De manera similar, se realizó la prueba hacia una antena direccional HG908p-SM de la empresa L-COM, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.

La sección del espectro utilizada por el módulo LoRa 900 se encuentran delimitadas por las barras rojas verticales. Se observó que ninguna de las antenas analizadas fueron

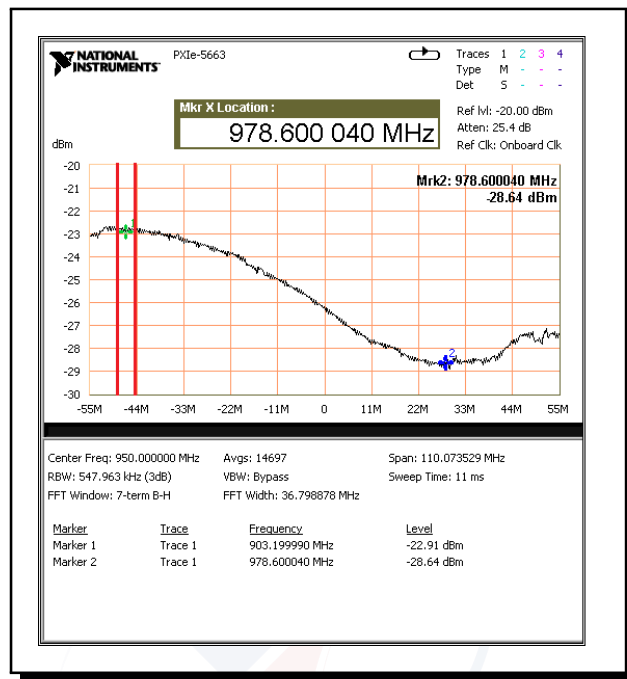


Figura 6: Impedancia antenna omnidireccional

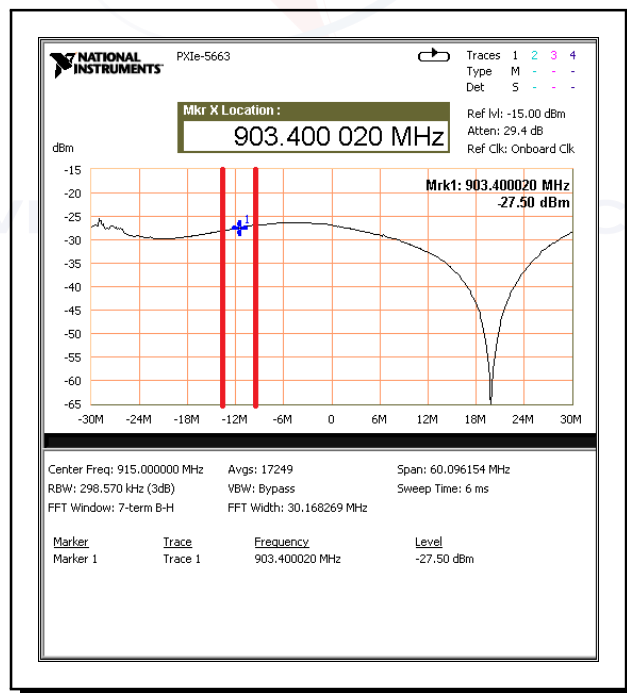


Figura 7: Impedancia antenna direccional

construidas con una frecuencia de resonancia acorde a la frecuencia de transmisión

utilizada. Al no tener una antena de referencia, no se pudo validar la ganancia de las mismas.

4. Metodología

4.1. Pruebas en Laboratorio

Se realizaron pruebas de transmisión en un ambiente controlado con el objetivo de verificar la relación existente entre la medición de RSSI entregada por el equipo LoRa 900 y la atenuación introducida.

Estos resultados serán útiles para comprobar si este valor puede ser utilizado para la construcción de un modelo de propagación para varios ambientes.

4.1.1. Diagrama de bloques de la prueba

La disposición de los equipos utilizados se muestra en la Figura 8, los módulos se encuentran acoplados a través de cables de transmisión de RF caracterizados en la Sección 3.1, en el centro se colocó un atenuador variable para simular las pérdidas de espacio libre existente entre los equipos de transmisión.

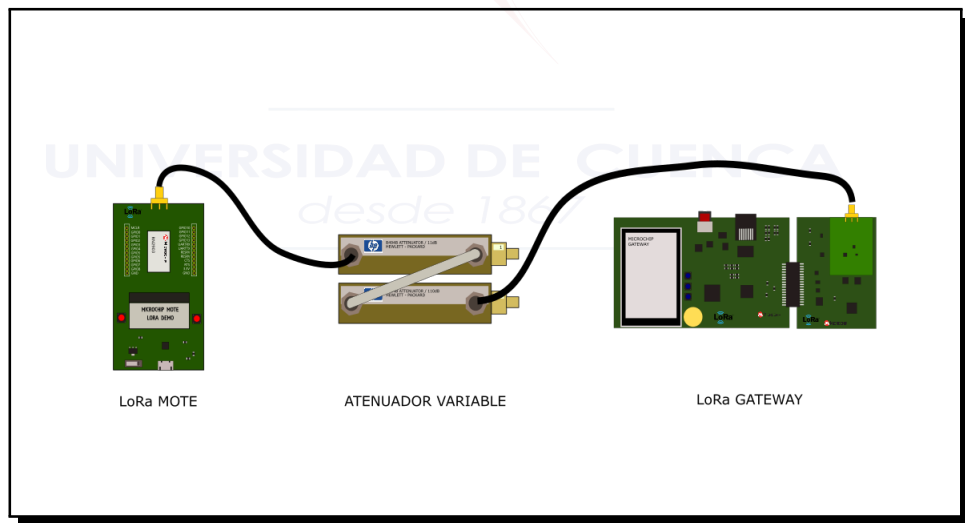


Figura 8: Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio

4.1.2. Configuraciones de los equipos

La configuración utilizada para la transmisión controlada en laboratorio fue:

- Dirección del dispositivo de red : 001AD314
- Clave de Aplicación : 3C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D
- Clave de Red : 2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C
- Potencia de transmisión : 18.5 dBm (pwridx 5)
- Data Rate : 980 bit/sec (DR 0) y 5470 bit/sec (DR 7)

4.1.3. Procedimiento de adquisición de datos

La prueba de transmisión consiste en el envío de 300 paquetes, cada paquete recibido entrega un valor de RSSI y SNR, dicha información es almacenada en el servidor para su posterior análisis.

Las iteraciones se iniciaron con una atenuación entre los equipos de 50dB, el cual fue el valor obtenido en pruebas de transmisión por aire con una separación de 1 metro. Para obtener una resolución aceptable se realizaron pruebas hasta los 170dB de atenuación con un paso entre cada iteración de 5dB.

4.2. Pruebas en Campo

Se realizaron pruebas de transmisión en dos tipos de ambientes, el primero ubicado dentro de la Universidad de Cuenca como se observa en la Figura 9, sin línea de vista entre el transmisor y el receptor de LoRaWAN. El segundo ubicado entre el Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay (CICA) y el mirador de Turi como indica la Figura 10, sin obstáculos entre los equipos de transmisión.

El procedimiento de configuración y adquisición de equipos utilizado es similar a lo expuesto en las Secciones 4.1.2 y 4.1.3, tomando como atenuación inicial las pérdidas por espacio libre debido a la distancia entre los equipos de transmisión.

Adicionalmente se realizaron pruebas de transmisión con variaciones de tamaño de trama y factor de ensanchamiento.

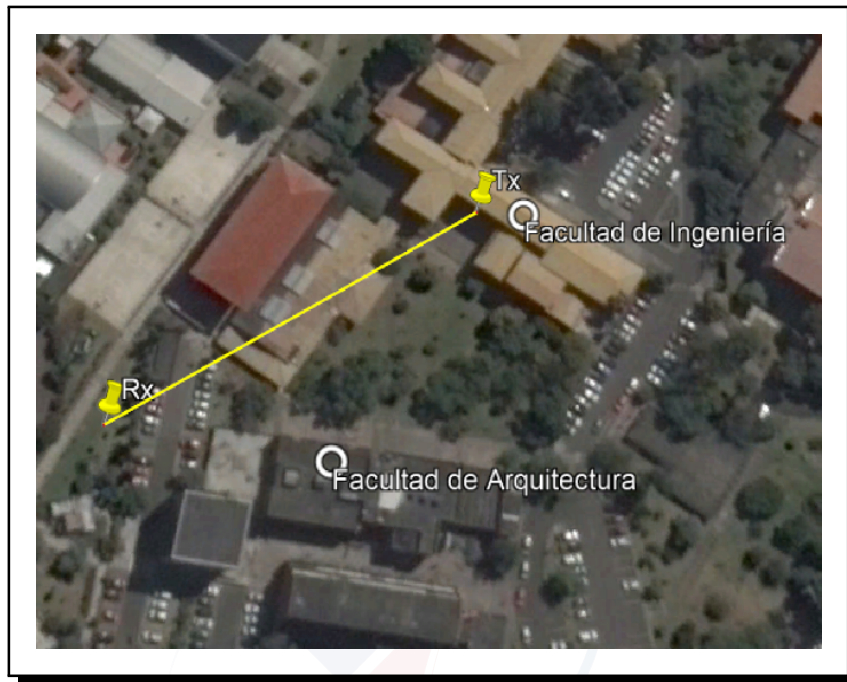


Figura 9: Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros

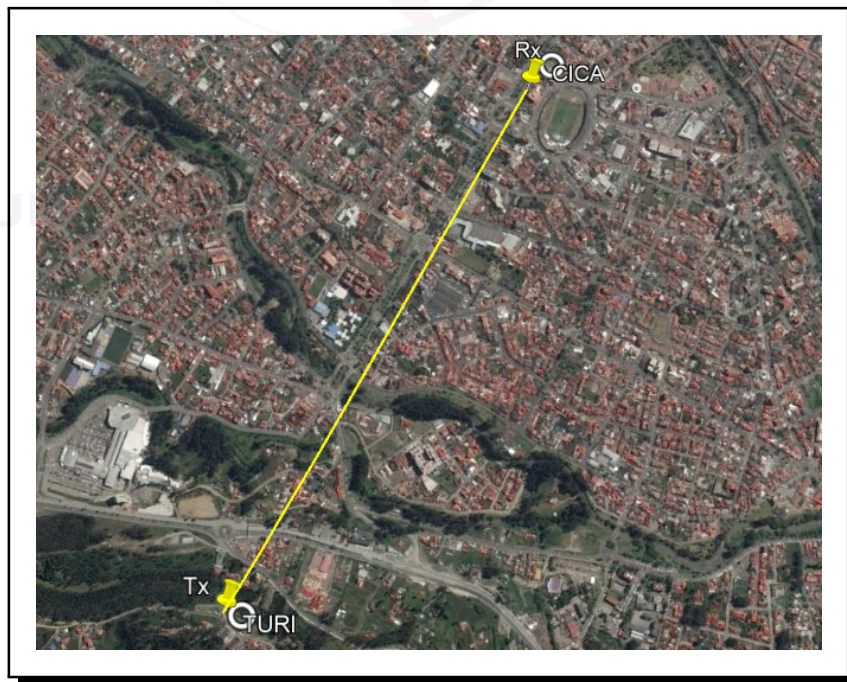


Figura 10: Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros

5. Resultados

5.1. Pruebas de Laboratorio

Luego del análisis de los datos, se pudo observar que el RSSI se comporta de manera lineal con respecto a la atenuación introducida como se observa en la Figura 11, sin embargo se observó que para valores de RSSI menores a -110dBm los valores entregados por el equipo no son confiables ya que la medida no corresponde a la atenuación introducida.

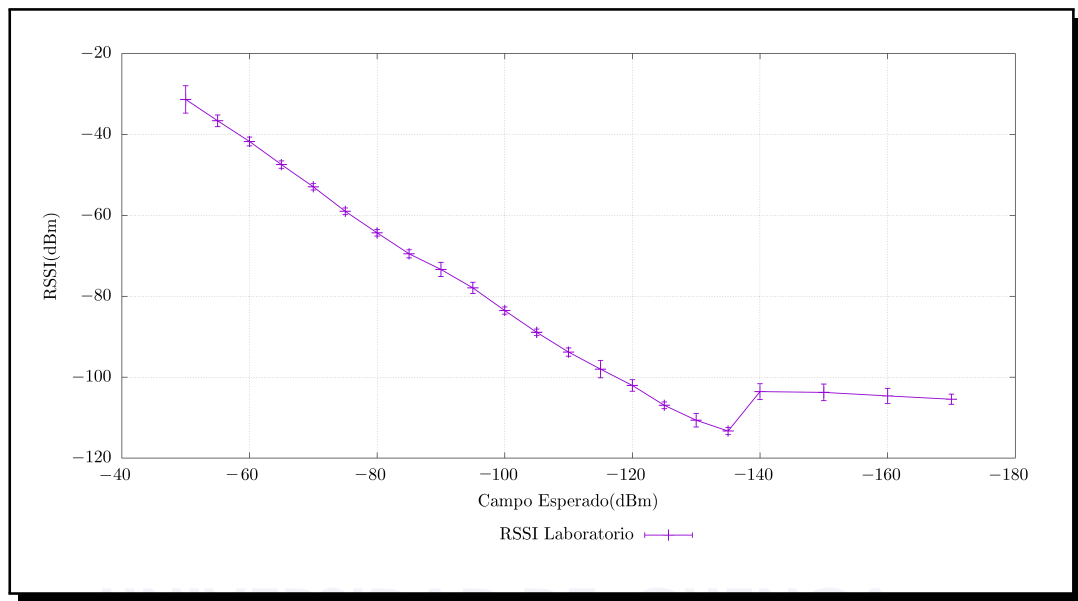


Figura 11: Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación

Por otro lado, el porcentaje de paquetes perdidos se mantuvo estable con valores entre el 2 % y 6 % como se muestra en la Figura 12. La relación señal a ruido se mantuvo con una variación mínima hasta un nivel de potencia de -110dBm donde el valor empieza a decaer, tal como se muestra en la Figura 13.

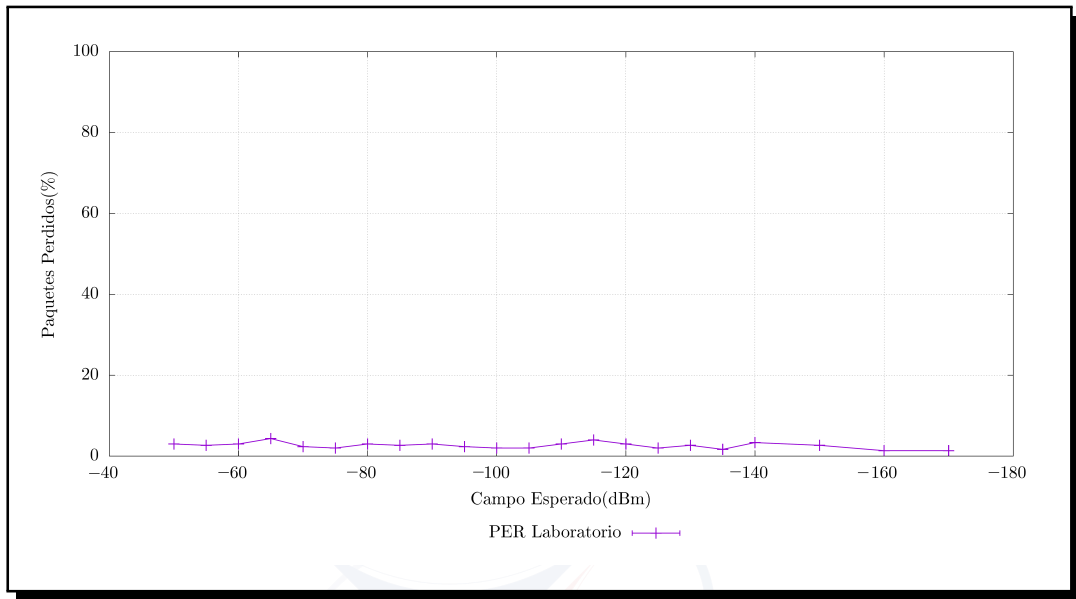


Figura 12: Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación

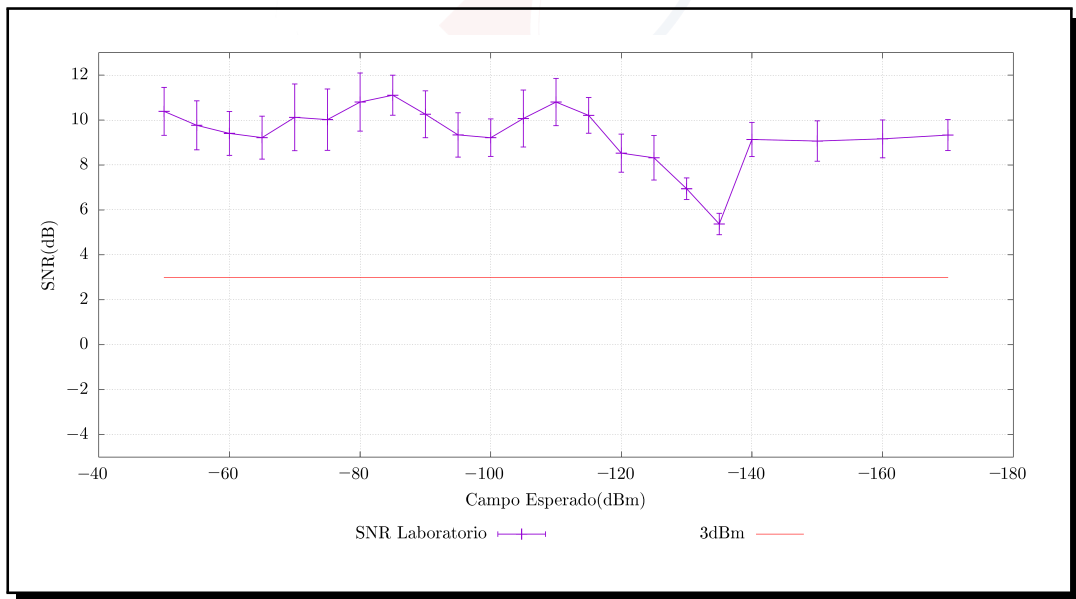


Figura 13: Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación

5.2. Pruebas de Campo

5.2.1. Ambiente 1: Universidad de Cuenca

Las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca mostraron que los valores de RSSI no cuentan con el comportamiento lineal obtenido en las pruebas de

laboratorio, esto se puede evidenciar en las Figuras 14 y 17.

Por otro lado se pudo observar dos tendencias en los valores de paquetes perdidos que corresponden al *spreading factor* utilizado, como se observa en la Figura 16.

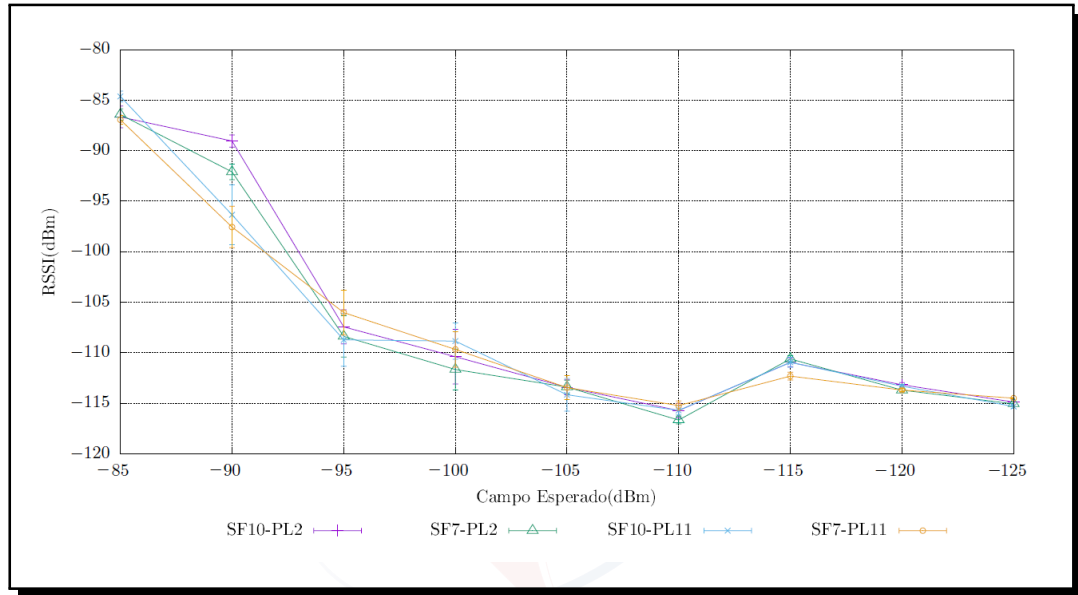


Figura 14: Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado

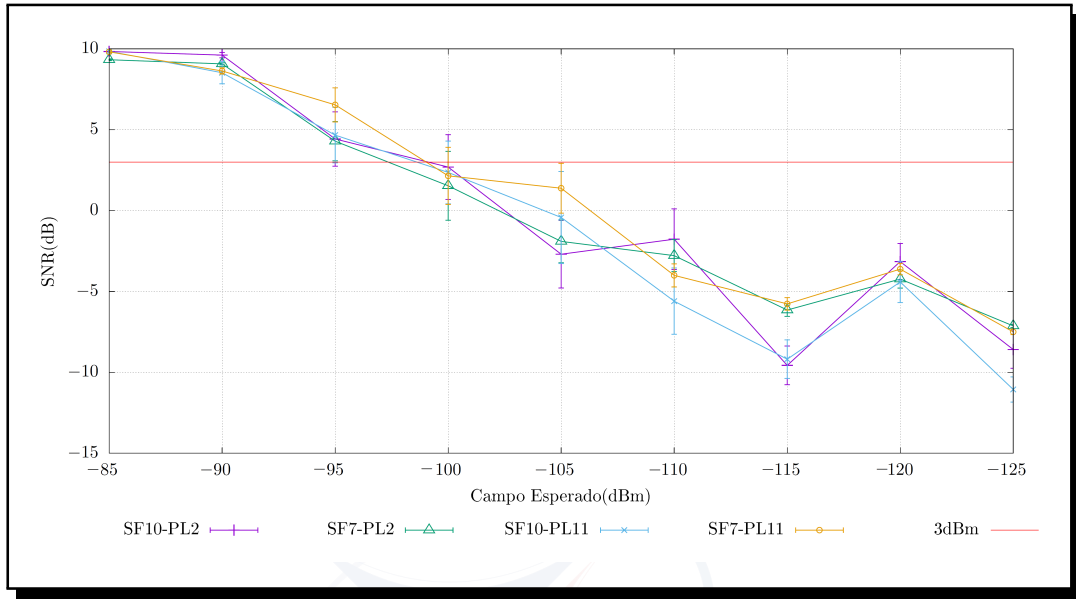


Figura 15: Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado

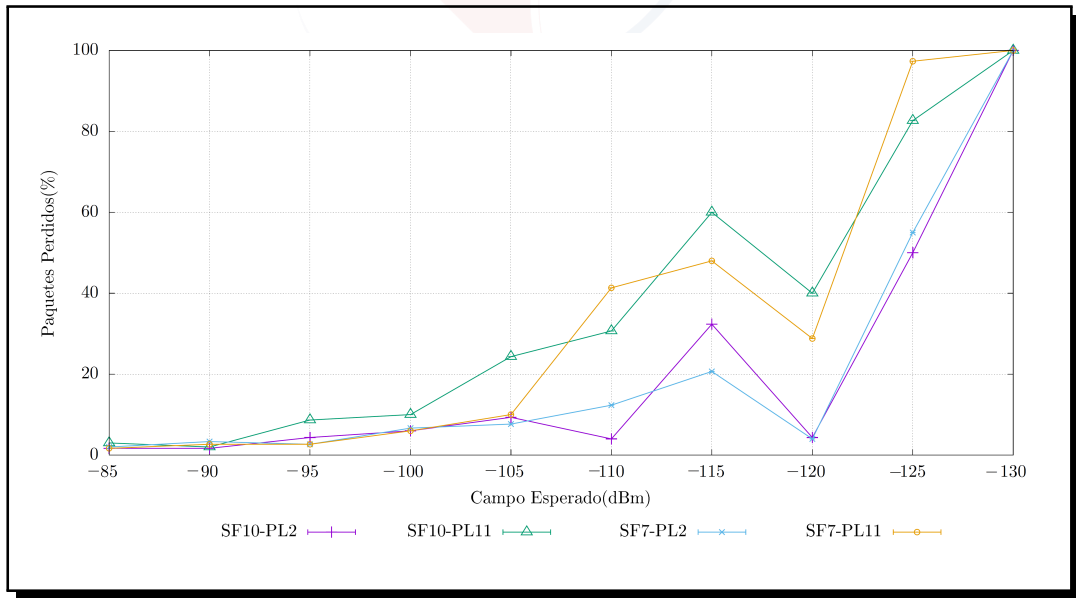


Figura 16: Ambiente 1: PER vs Campo Esperado

5.2.2. Ambiente 2: Transmisión con línea de vista

Los resultados de RSSI medidos en este ambiente con los dos tipos de antena expuestas en la Sección 3.5 corresponden a los valores de campo esperados y a los resultados obtenidos en el laboratorio. Los resultados obtenidos se presentan en las

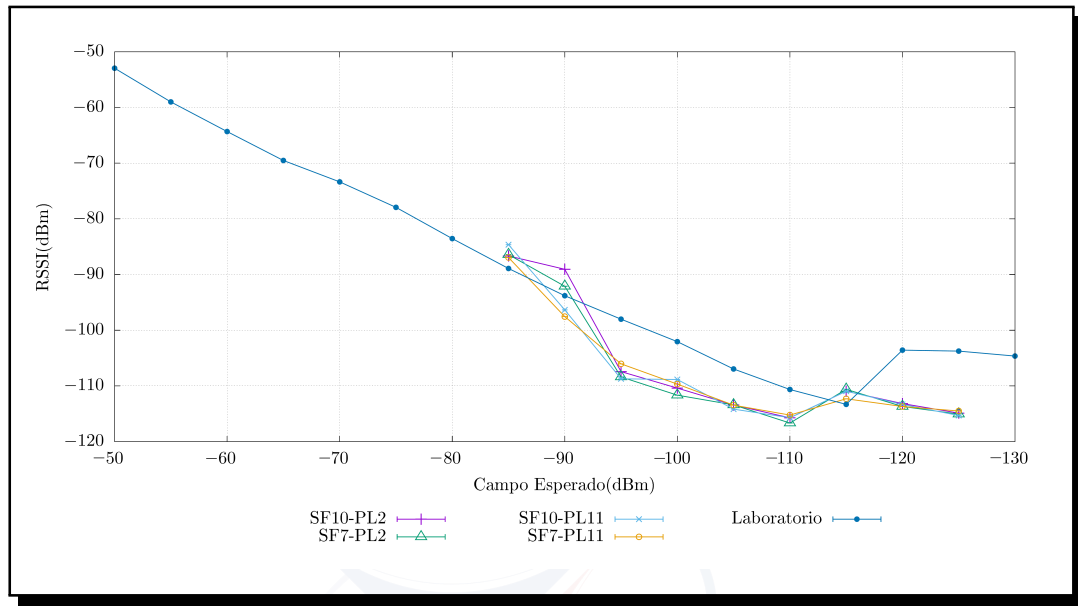


Figura 17: Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

Figuras 18,21,22 y 25.

De la misma forma que el ambiente 1, los valores de paquetes perdidos tienen relación con el factor de ensanchamiento utilizado, esto se puede evidenciar en la Figuras 20 y 24, donde el porcentaje de paquetes perdidos es menor al 10 % en valores de RSSI mayores a -110dBm.

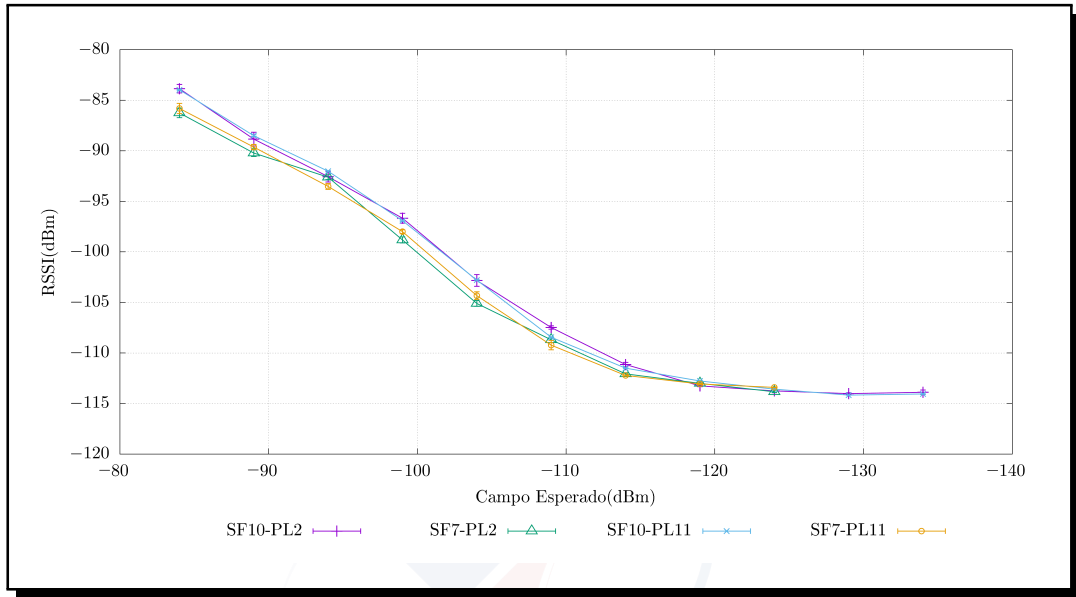


Figura 18: Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado

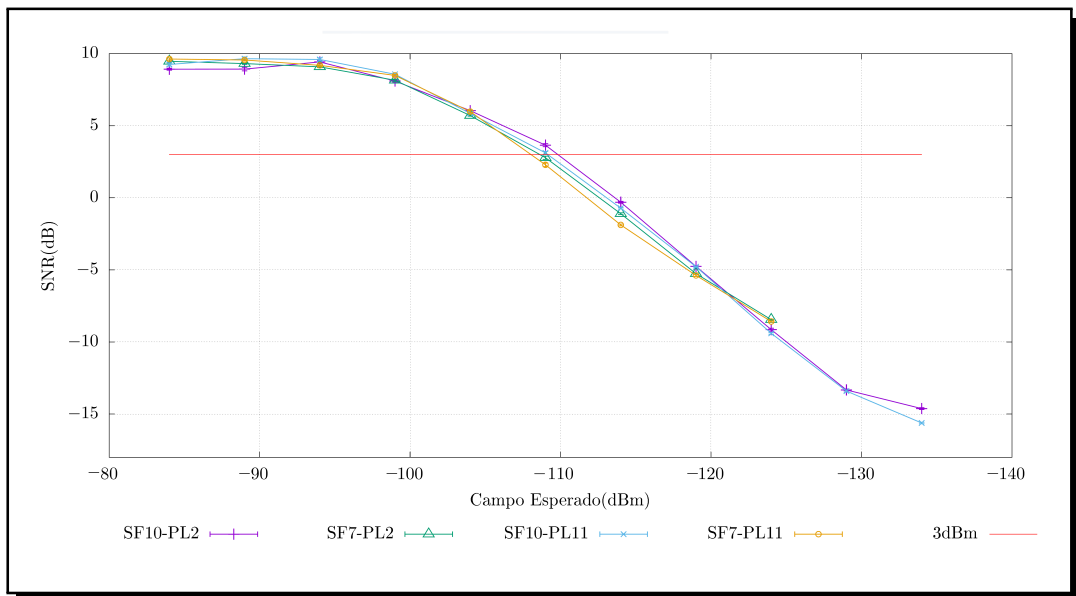


Figura 19: Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado

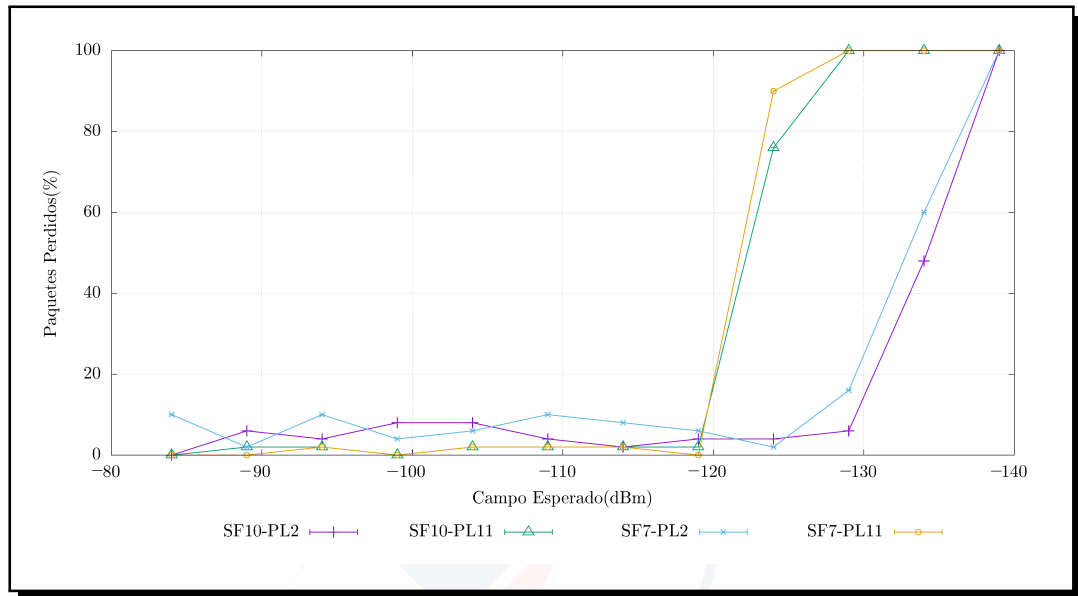


Figura 20: Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado

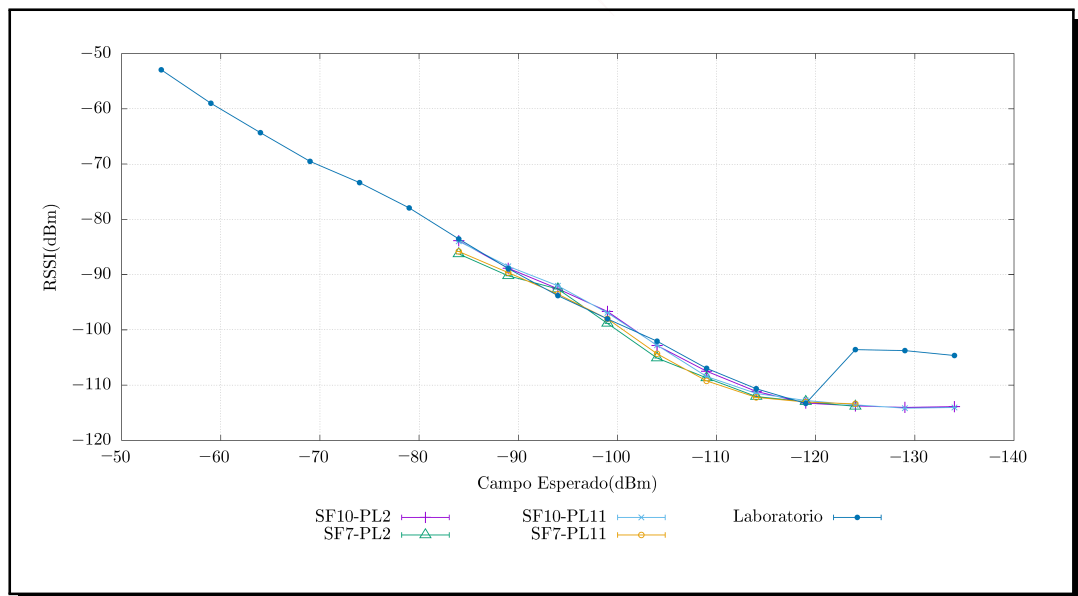


Figura 21: Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

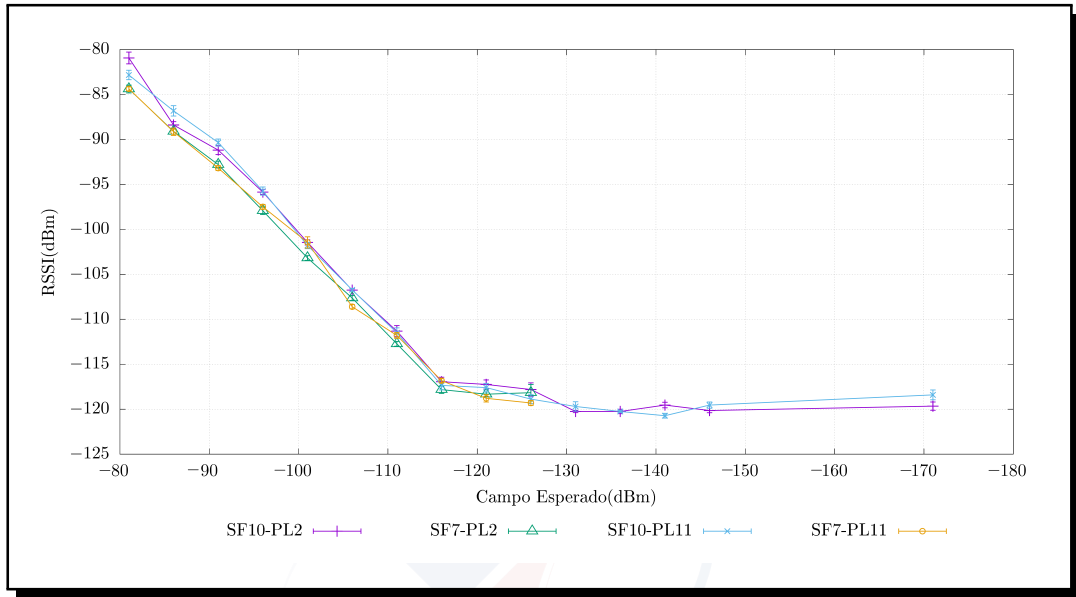


Figura 22: Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado

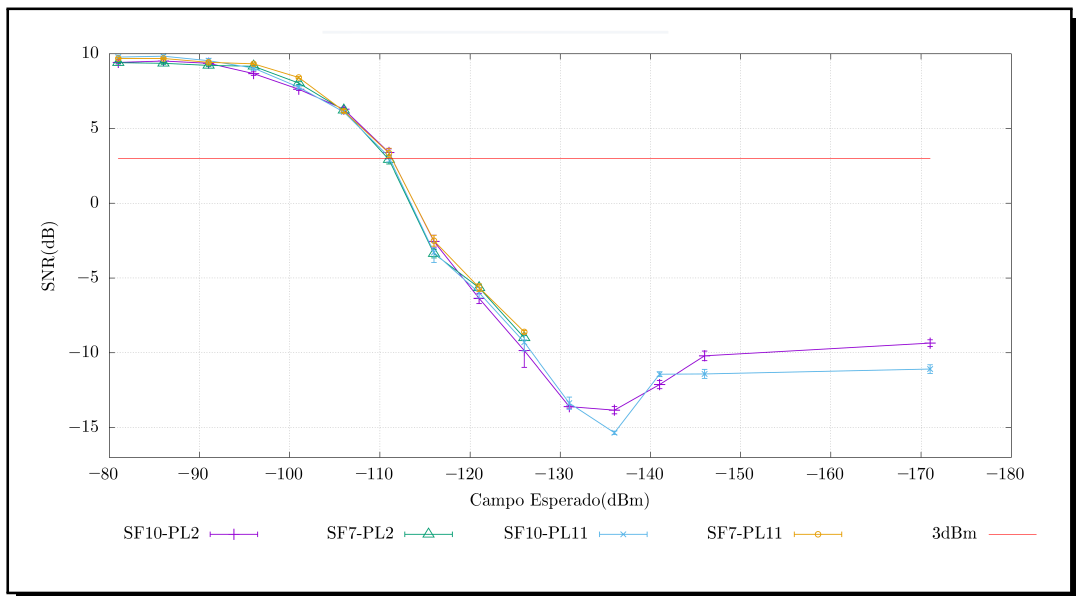


Figura 23: Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado

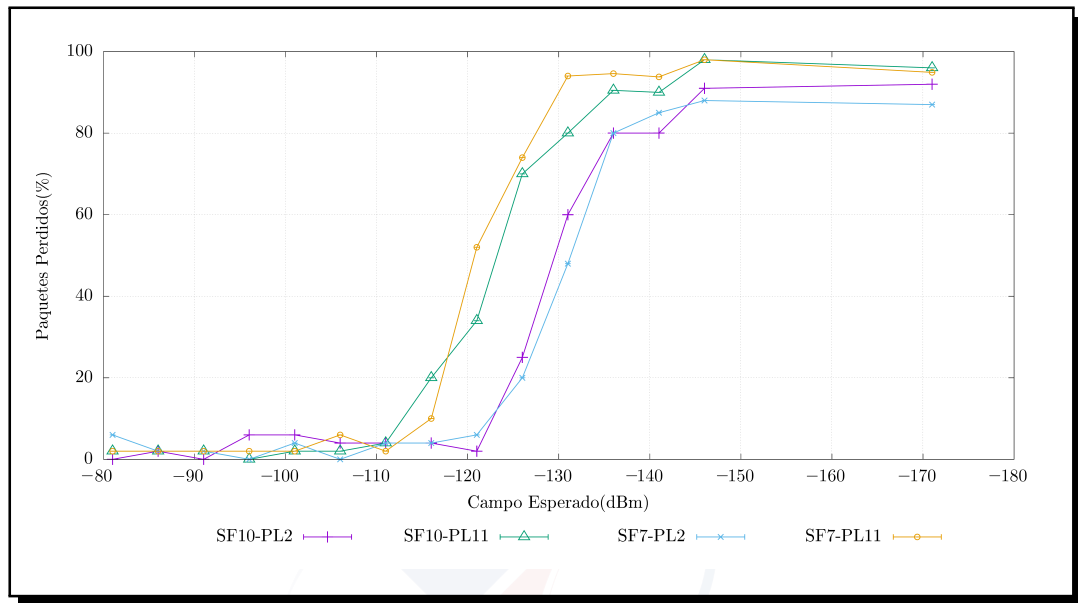


Figura 24: Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado

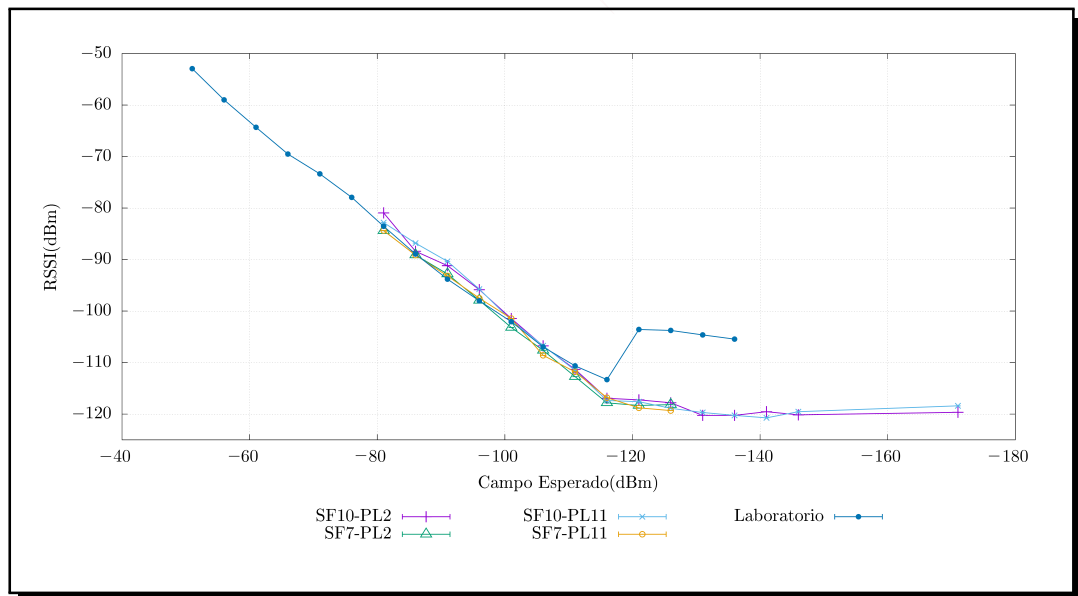


Figura 25: Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

6. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos muestran que los valores de RSSI entregados por el equipo corresponden a los valores de atenuación introducidas en las diferentes pruebas realizadas, este comportamiento se mantiene estable hasta los -110dBm, para valores menores a dicho umbral el equipo entrega valores que no se pueden considerar fiables para su uso en modelos de pérdida de trayectoria.

En las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca existen valores de RSSI que no tienen relación con el campo esperado debido al tráfico de personas cerca del equipo de transmisión, por lo que se obtuvo una diferencia entre 5 y 10 dB de atenuación adicional.

El porcentaje de paquetes perdidos se mantiene estable en aproximadamente el 6 %, este valor empieza a aumentar para cantidades menores de RSSI de -100dBm con factor de ensanchamiento de 7 y valores menores de RSSI de -110dBm con factor de ensanchamiento de 10.

Por otro lado, los resultados no arrojaron diferencias importantes entre el uso de la antena omnidireccional incluida en el paquete de desarrollo LoRa 900 y la antena direccional HG908p-SM, esto se debe a que la frecuencia de resonancia de los dos tipos de antena se encuentra alejada de la frecuencia de transmisión del módulo LoRa.

Se recomienda utilizar un valor de 0 dBi para cualquier cálculo matemático al utilizar el equipo de desarrollo con estas antenas, además el diseño y construcción de antenas con frecuencia de resonancia de 903MHz para la ejecución de proyectos de investigación futuros con dicho módulo.

Referencias

- [1] MICROCHIP, *RN2903 LoRa Technology Module Command Reference User's Guide*, 2015.
- [2] MICROCHIP, *LoRaWAN Specification*, 2015.
- [3] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent Technologies 8494A/B, 8495A/B, and 8496A/B Attenuators*, 2002.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent 8491A/B, 8493A/B/C, 11581A, 11582A and 11583C*, 2010.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, *USB-5681 Specifications*, 2010.
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS, *Tutorial, ¿Qué es PXI?*, 2017.

- [7] NATIONAL INSTRUMENTS, *Introducción a la Arquitectura PXI*, 2016.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS, *Preguntas Frecuentes sobre PXI Express*, 2012.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS, *Producto, ¿Qué es PXI?*, 2017.



A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa

A.1. Instalación de librería para el descifrado

Para el descifrado de los datos recibidos se utilizó la librería lora-package la cual se encuentra implementada en el lenguaje JavaScript. Los comandos para la instalación de los paquetes necesarios en un sistema operativo basado en Linux son los siguientes.

- `sudo apt-get install npm`
- `npm install -g crypto-js`
- `npm install -g node-aes-cmac`
- `npm install -g lora-packet`
- `npm install -g lora-decrypt`

A.2. Código para el descifrado

El siguiente código debe copiarse a la ruta de instalación de la librería lora-packet con el nombre lora-decrypt.

```
1  #!/usr/bin/env node
2
3  "use strict";
4
5  /**
6   * LoRa Decrypt Code
7   * Ucuencia
8   */
9  var lora_packet = require('../lib/index.js');
10 var cmdLineArgs = process.argv;
11
12 //Start
13 var inputData = new Buffer(cmdLineArgs[2], 'base64');
14 var packet = lora_packet.fromWire(inputData);
15 var AppSKey_hex = "3c8f262739bfe3b7bc0826991ad0504d";
16 var NwkSKey_hex = "2b7e151628aed2a6abf7158809cf4f3c";
17 var decrypted = lora_packet.decrypt(packet, new Buffer(AppSKey_hex,
18   'hex'), new Buffer(NwkSKey_hex, 'hex'));
19 //Output
20 console.log (decrypted)
```

Listing 1: Código de descifrado lora-decrypt

A.3. Código del Servidor

La implementación del servidor se la realizó en el lenguaje de programación Python, el código recibe los datos procedentes del Gateway por la interfaz Ethernet, dichos datos se guardan en un archivo .csv, el nombre de dicho archivo es ingresado al momento de iniciar el código.

```
1 #Este Scrip crea un archivo .csv con las transmisiones procedentes
  del gateway
2 #Creado por : Juan Francisco Peralta Santos
3 #juan.peraltas@ucuenca.ec
4
5 import socket
6 import sys
7 import subprocess
8 import statistics
9 import csv
10 import atexit
11
12 #-----Configuracion de Socket UDP-----
13 port = 1700
14 s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
15 s.bind(("", port))
16 print "-----"
17 print "-----UNIVERSIDAD DE CUENCA-----"
18 print "-----"
19 print "Escuchando el puerto:", port
20
21
22 #-----Funciones-----
23 def cut_comas(indexD, inicio):
24     index = indexD + 7
25     ban = 0
26     while index <= len(data) and ban == 0:
27         if data[index] == ',':
28             return data[indexD + inicio:index + 1]
29             ban = 1
30         else:
31             index = index + 1
32
33 #-----Comentarios Para el archivo csv-----
34 arch=raw_input("Nombre del Archivo :")
35 pot=raw_input("Potencia de Transmicion :")
36 altura=raw_input("Altura :")
37 payl=raw_input("Payload :")
38
39 #-----Crear csv y escribir titulos de columna-----
40 f = open(arch+'.csv', 'wt')
41 writer = csv.writer(f)
42 writer.writerow(('Potencia', pot, 'Altura', altura, 'Payload', payl))
43 writer = csv.writer(f)
44 writer.writerow((' ', ' ', ' ', ' '))
```



```

45 writer = csv.writer(f)
46 writer.writerow(('Paquete', 'Tmst', 'Frecuencia', 'Canal', 'RFCanal', '
    DatTrans', 'Tamano', 'RSSI', 'SNR', 'Encode DATA', 'DATA'))
47 print "Esperando datos ....."
48
49 #----- Recibir datos del socket,desencriptar y guardar en csv
    -----
50 try:
51     con=0 #Contador de numero de paquetes recibidos
52     while 1:
53         data, addr = s.recvfrom(1024)
54         longitud = len(data)
55         if longitud >= 150:
56             con = con + 1
57             long = len(data)
58             tmstp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('tmst')]
59             freqp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('freq')]
60             chanp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('chan')]
61             rfchp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rfch')]
62             rssip = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rssi')]
63             datap = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('data')]
64             datrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('datr')]
65             sizep = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('size')]
66             lsnrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('lsnr')]
67             tmst = cut_comas(tmstp[0],4)
68             datos=cut_comas(datap[0],6)
69             datr = cut_comas(datr[0],6)
70             rssi=cut_comas(rssip[0],4)
71             freq=cut_comas(freqp[0],4)
72             size = cut_comas(sizep[0],4)
73             chan = cut_comas(chanp[0],4)
74             rfch = cut_comas(rfchp[0],4)
75             snr=cut_comas(lsnrp[0],4)
76             datosdec = subprocess.check_output('nodejs /usr/local/
                lib/node_modules/lora-packet/bin/lora-decrypt ' +
                datos, shell=True).decode('utf-8')
77             writer = csv.writer(f)
78             writer.writerow((con,tmst[2:-2],freq[2:9],chan[2],rfch
                [2],datr[1:-2],size[2:-2],rssi[2:-2],snr[2:-2],datos
                [1:-1],datosdec[8:-2]))
79             print "PAQUETE:"+str(con)+" == "+" Freq:"+freq[2:9]+"
                RSSI:"+rssi[2:-2]+" SNR:"+snr[2:-2]+" Size:"+size
                [2:-2]+" Data:"+datosdec[8:-2]

```

```

80 #----- Cerrar socket y archivo csv -----
81 finally:
82     print "Finalizando....."
83     s.close()
84     f.close()

```

Listing 2: Código del Servidor

B. Anexo II: Código del Transmisor

El código para la transmisión de datos se la realizo en el lenguaje de programación Python, este código envía las configuraciones y peticiones al nodo por medio de una interfaz serial USB.

```

1  import serial
2  import time
3  import sys
4
5  # import RPi.GPIO as GPIO
6  LedPin = 11 # pin11
7
8  BAUD_RATE = 57600
9
10
11 class LoRaSerial(object):
12     def __init__(self, _serial_port):
13         '''
14             configures serial connection
15         '''
16         self._ser = serial.Serial(_serial_port, BAUD_RATE)
17
18         # timeout block read
19         self._ser.timeout = 8
20
21         # disable software flow control
22         self._ser.xonxoff = False
23
24         # disable hardware (RTS/CTS) flow control
25         self._ser.rtscts = False
26
27         # disable hardware (DSR/DTR) flow control
28         self._ser.dsrtdtr = False
29
30         # timeout for write
31         self._ser.writeTimeout = 0
32
33         # print "Resetting LoRa Tranceiver..."
34         self.write_command('sys reset', False)
35         # print "Configuring Tranceiver..."
36         # Mac Configuration

```

```

37     self.write_command('mac set devaddr 001AD314')
38     self.write_command('mac set appskey 3
39         C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D')
40     self.write_command('mac set nwkskey 2
41         B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C')
42     self.write_command('mac set adr off')
43     self.write_command('mac set sync 34')
44     self.write_command('mac set pwridx 10')
45     self.write_command('mac set dr 0')
46     self.write_command('mac save')
47
48     # Configure sub-bands
49     for ch in range(0, 63):
50         self.write_command('mac set ch status %d %s' % (ch, 'on'
51             if ch in range(0, 7) else 'off'))
52
53     # join the network
54     # print "Attempting to Join Network..."
55     self.write_command('mac join abp')
56     response = self.read()
57     if response == 'accepted':
58         print "LoRa Tranceiver Configured. Joined (ABP)"
59     else:
60         print "ERROR: mac join returned unexpected response: ",
61             response
62
63 def read(self):
64     '''
65     reads serial input
66     '''
67     return self._ser.readline().strip()
68
69 def write(self, str):
70     '''
71     writes out string to serial connection, returns response
72     '''
73     self._ser.write(str + '\r\n')
74     return self.read()
75
76 def write_command(self, config_str, check_resp=True):
77     '''
78     writes out a command
79     '''
80     # print "Command: '%s'" % config_str
81     response = self.write(config_str)
82     if check_resp and response != 'ok':
83         print "Command: '%s'" % config_str
84         print "Response: '%s'" % response
85
86 def send_message(self, data):
87     '''
88     sends a message to gateway

```

```

85         '''
86         # print "Sending message... "
87         # send packet (returns 'ok' immediately)
88         self.write_command('mac tx uncnf 5 ' + data)
89         # wait for success message
90         response = self.read()
91         if response == 'mac_tx_ok':
92             print "Message sent successfully!"
93         else:
94             print "ERROR: mac tx command returned unexpected
95                   response: ", response
96
97     def receive_message(self):
98         '''
99         waits for a message
100        '''
101        pass
102
103 if __name__ == "__main__":
104
105     port = '/dev/ttyACM0'
106     packets = 100
107     loramote = LoRaSerial(port)
108     data = "un"
109     print data.encode("hex")
110     for i in range(1, packets + 1):
111         loramote.send_message(data.encode("hex"))

```

Listing 3: Código del Transmisor

Bibliografía

- [1] N. S. (Semtech), M. L. (Semtech), T. E. (IBM), T. K. (IBM), (Actility), y . O.Hersent, “LoRaWAN™ Specification,” p. 82. [En línea]. Disponible: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRaWANSpecification1R0.pdf>
- [2] “LoRa ® Technology Evaluation Suite User’s Guide,” Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001847A.pdf>
- [3] “LoRa ® Technology Gateway User’s Guide,” Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001827A.pdf>
- [4] “LoRa ® Technology Gateway User’s Guide,” Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001827A.pdf>
- [5] “Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi.” [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/{#}buy-now-modal>
- [6] “What is LoRa Radio Network | IoT Technology, Examples, FAQ | Semtech.” [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/technology/lora/what-is-lora>
- [7] M. Beaver, B. Mendenhall, y Beaver, *Introducción a la probabilidad y estadística*, décima ter ed., M. William, B. Robert J, y B. M. Barbara, Eds. [En línea]. Disponible: <http://latinoamerica.cengage.com>
- [8] Y. Li, X. Yan, L. Zeng, y H. Wu, “Research on water meter reading system based on LoRa communication,” in *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. IEEE, jul 2017, pp. 248–251. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8038585/>
- [9] E. Inga, R. Hincapie, C. Suarez, y G. Arevalo, “Shortest path for optimal routing on Advanced Metering Infrastructure using cellular networks,” in *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)*. IEEE, may 2015, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7152078/>

- [10] F. Facchini, G. M. Vitetta, A. Losi, y F. Ruscelli, "On the performance of 169 MHz WM-Bus and 868 MHz LoRa technologies in smart metering applications," in *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*. IEEE, sep 2017, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8065900/>
- [11] M. R. Seye, B. Gueye, y M. Diallo, "An evaluation of LoRa coverage in Dakar Peninsula," in *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. IEEE, oct 2017, pp. 478–482. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8117211/>
- [12] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadiania, y N. Strachan, "Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks," in *2016 IEEE SENSORS*. IEEE, oct 2016, pp. 1–3. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7808712/>
- [13] "What is LoRa Radio Network | IoT Technology, Examples, FAQ | Semtech." [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/technology/lora/what-is-lora>
- [14] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, y M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. IEEE, dec 2015, pp. 55–59. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7377400/>
- [15] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, y J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?" in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '16*. New York, New York, USA: ACM Press, 2016, pp. 59–67. [En línea]. Disponible: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2988287.2989163>
- [16] R. Pérez García, "Avaluació de LoRa/LoRaWAN per a escenaris de smart city," feb 2017. [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100922>
- [17] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, num. 5, pp. 60–67, oct 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7721743/>
- [18] J. Harris, N. Curry, "Development and Range Testing of a LoRaWAN System in an Urban Environment," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2018.
- [19] V. Thiemo y B. Martin, "LoRaSim." [En línea]. Disponible: <http://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/lorasim.html>
- [20] U. Raza, P. Kulkarni, y M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, num. 2, pp. 855–873, 2017. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7815384/>



- [21] F. J. Grion, G. O. Petracca, D. F. Lipuma, y E. R. Amigo, "LoRa network coverage evaluation in urban and densely urban environment simulation and validation tests in Autonomous City of Buenos Aires," in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*. IEEE, sep 2017, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8214345/>
- [22] A. A. – Apostolos Boulogeorgos, P. D. Diamantoulakis, S. Member, y G. K. Karagiannidis, "Low Power Wide Area Networks (LPWANs) for Internet of Things (IoT) Applications: Research Challenges and Future Trends," 2016. [En línea]. Disponible: <https://arxiv.org/pdf/1611.07449.pdf>
- [23] J. I. Laveyne, G. V. Eetvelde, y L. Vandeveld, "Application of LoRaWAN for Smart Metering: An Experimental Verification," *International Journal of Contemporary ENERGY*, vol. 4, num. 1, 2018. [En línea]. Disponible: <http://contemporary-energy.net/v04n01a07-Joannes-Laveyne.pdf>
- [24] M. D. C. CARRIÓN GONZÁLEZ, "Desarrollo de una pasarela LORA y evaluación de prestaciones," nov 2017. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/91597>
- [25] F. Palate, "Consejo Nacional de Telecomunicaciones Secretaría Nacional de Telecomunicaciones," Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan{ }nacional{ }frecuencias{ }2012.pdf>
- [26] Iswandi, H. T. Nastiti, I. E. Praditya, y I. W. Mustika, "Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI)," in *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*. IEEE, oct 2016, pp. 56–60. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7877347/>
- [27] T. Rama Rao, D. Balachander, A. Nanda Kiran, y S. Oscar, "RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks," in *2012 International Conference on Recent Trends in Information Technology*. IEEE, apr 2012, pp. 308–313. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6206765/>
- [28] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, y W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, num. 9, p. 1466, sep 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>
- [29] R. Oliveira, L. Guardalben, y S. Sargento, "Long range communications in urban and rural environments," in *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE, jul 2017, pp. 810–817. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8024627/>



- [30] P. J. Radcliffe, K. G. Chavez, P. Beckett, J. Spangaro, y C. Jakob, “Usability of LoRaWAN Technology in a Central Business District,” in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, jun 2017, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8108675/>
- [31] P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi, M. Rizzi, y E. Sisinni, “On the use of LPWAN for EVehicle to grid communication,” in *2017 AEIT International Annual Conference*. IEEE, sep 2017, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8240531/>
- [32] “LoRa(R) Technology Evaluation Kit - 900.” [En línea]. Disponible: <http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails/dv164140-2>
- [33] CENTROSUR, “Instructivo de Servicios,” p. 62. [En línea]. Disponible: <http://www.centrosur.gob.ec/sites/default/files/InstructivodeServiciosCentrosur.pdf>
- [34] R. E. Walpole, R. Myers, S. Myres, y K. Ye, Eds., *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, novena ed. Pearson, 2012. [En línea]. Disponible: https://verenicafunez94hotmail.files.wordpress.com/2014/08/8va-probabilidad-y-estadistica-para-ingenier-walpole{__}8.pdf
- [35] D. J. Sheskin, *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, cuarta ed. Chapman y Hall/CRC. [En línea]. Disponible: http://library.mpib-berlin.mpg.de/toc/z2007{__}770.pdf
- [36] Minitab.com, “Comparaciones múltiples de Kruskal Wallis.” [En línea]. Disponible: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/macro-library/macro-files/nonparametrics-macros/krusmc/>
- [37] S. García, D. Molina, y F. Lozano, Manuel, Herrera, “Tests no paramétricos de comparaciones múltiples con algoritmo de control en el análisis de algoritmos evolutivos: Un caso de estudio con los resultados de la sesión especial en optimización continua CEC’2005,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://sci2s.ugr.es/keel/pdf/keel/congreso/Garcia-Jaem07.pdf>
- [38] T. Voigt y B. Martin, “LoRaSim.” [En línea]. Disponible: <http://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/lorasim.html>